

TESIS DOCTORAL

# Análisis tonal asistido por ordenador

*Autor:*

Plácido Román  
ILLESCAS CASANOVA

*Supervisada por:*

José Manuel IÑESTA QUEREDA  
David RIZO VALERO



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

Departament de Llenguatges i Sistemes Informàtics  
Departamento de Lenguajes y Sistemas Informáticos

Programa de doctorado: APLICACIONES DE LA INFORMÁTICA

Tesis presentada para aspirar al grado de  
DOCTOR POR LA UNIVERSIDAD DE ALICANTE

Enero 2016

# Agradecimientos

Hace cerca de unos once años, había un gran revuelo entre mis compañeros de trabajo con el objetivo de hacer un doctorado y, un día, tomando café con un compañero de trabajo y gran amigo mío llamado Sixto Herrero, éste me comentó la posibilidad de hacer un doctorado. Por lo general, la mayoría de mis compañeros lo estaban haciendo en las especialidades de letras, principalmente en la facultad de filosofía, aunque también en didáctica o filología entre otras, por lo que yo, le contesté a Sixto que no estaba interesado en hacer un doctorado en algo que no me gustase. Sixto, que sabía de mi gran devoción por las matemáticas, la física y la informática y después de varios intentos por convencerme para hacer el doctorado, ese día, me comentó que en la facultad de informática de la Universidad de Alicante había un Catedrático llamado José Manuel Iñesta que se dedicaba a hacer “cosas” de música con el ordenador, animándome a ir a hablar con él para intentar hacer el doctorado en su departamento. El resultado final de esa conversación se va a plasmar unos once años después, con la lectura de mi tesis en el Departamento de Lenguajes y Sistemas Informáticos de la Universidad de Alicante. Por todo ello, mi agradecimiento a mi queridísimo Sixto por su interés y perseverancia en animarme a hacer el doctorado y por ser el artífice de que a día de hoy disfrute de lo que más me gusta; la investigación músico-computacional.

Agradezco también a mi Tutor D. José Manuel Iñesta, ante todo, por haber confiado en mí y darme la oportunidad de formar parte de su gran departamento sin el cual yo no hubiese podido llegar hasta aquí, por el curso de doctorado que impartió denominado Computerización Avanzada de Música por Ordenador (C.A.M.O.) en donde me abrió los ojos y descubrí el maravilloso mundo que se escondía ante mí y, por tutelarme y guiarme durante todos estos años siendo, participe de mi trabajo y reforzando mi aprendizaje mediante estancias en el extranjero como la del I.R.C.A.M. y en distintas conferencias y congresos

Quiero dar las gracias también a D. José Oncina, que fue un honor para mí tenerlo de “compañero” en las clases de C.A.M.O. Aprendí muchísimo con él. Y a los demás profesores del DLSI que tan bien me han acogido, Luisa Micó, Pierre León, Carlos Pérez, Antonio Pertusa.

Al Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique (I.R.C.A.M.), especialmente al grupo de investigación de Representaciones musicales entre los que cabe destacar a Carlos Agón, Jean Bresson, Gérard Assayag y Moreno Andreatta, por su acogida y predisposición a ayudarme en todo lo necesario en mi estancia con ellos. Muchas gracias.

A mis compañeros de doctorado del D.L.S.I. José Bernabeu y Tomás Pérez, al igual que a María Hontanilla y al técnico del D.L.S.I. Javier Sober.

A Craig Sapp por cedernos sus análisis en formato **\*\*kern**.

A Rafael Ramírez, profesor del Departamento de Información y Comunicación Tecnológicas de la Universidad Pompeu Fabra de Barcelona, con el que realizamos la investigación sobre aprendizaje con *inductive logic programming*.

A David Meredith por sus consejos sobre el contenido de partes de esta tesis.

---

A los proyectos del ministerio TIN2013-48152-C2-1-R, TIN2009-14247-C02-02, TIN2006-14932-C02-02.

A mis compañeros de trabajo del Conservatorio Superior de Música de Murcia “Manuel Massotti Littel” y especialmente a todos los de mi departamento, entre los que cabe destacar a Javier Artaza por estar siempre dispuesto a ayudarme en todo lo necesario y poder disponer, en cualquier momento, de su gran conocimiento musical, a Joaquín Martínez-Oña, Paco Rico y Oscar Acacio que me han sabido escuchar y con los que he debatido sobre muchos conceptos de análisis musical que me ha servido de gran ayuda para realizar esta tesis además de a David Mora y Mateo Soto.

A mis alumnos que además de intentar enseñarles todo lo que sé de la mejor manera posible también he aprendido a “investigar” con ellos, además han hecho todo la comprobación del software de análisis tonal pudiendo tener a día de hoy el prototipo operativo y probado por alumnos reales: Jaime Enguinados, Raúl López, Luis Pérez de Tudela, Javier Vizcaino, David García, Juan Ramón Ortega, Javier Tapias, Víctor Lorente, Sara García, José Antonio Soriano, Manolo Toledo, Javi Pérez, Nieves Romero, Tato Méndez, Alba Misó, Miguel Angel Martínez, Iñaki Lecumberri, Francisco José Andreo, Javi Mondéjar, Yaiza Cano, Jesús Cruz, Rafa Gómez, Ricardo Ruiz, Ricardo Rex, Luis Suria, Jaime Belmonte, Marisa Acuña, Guillermo Ruano, Fuensanta Litago, Toni Guillén, Irene Oliva, Antonio José de Haro, Antonio Irigoyen, Pablo Peña, Rosa de los Reyes Trigueros, Claudia Moreno, Rosen García, Javier Muñoz, Arantxa Martínez, Mari Carmen Ramírez, Ana Cristina Vera, Rocío Ruiz, Charo Fructuoso, Carmen Julia Sandoval, Aitor Escorza, Salvador Pérez, Aníbal Cano, Javier Sáez, entre otros, muchas gracias.

A Miguel Ángel Centenero, director del C. S. M. de Murcia, por su gran dedicación al centro al igual que al anterior director, Miguel Baró.

A la siempre directora del colegio “Ntra. Señora de Belén” de La Aparecida, Doña Ana Mari, que ha sido mucho más que una directora, lo ha sido todo para el colegio, llegando siempre la primera al colegio y saliendo la última, estando siempre a disposición de los padres y pensando siempre en los niños. Con ella el colegio ha tenido hasta segundo curso de la ESO, dos, incluso, tres autobuses para llevar a todos y cada uno de los niños al colegio, además de comedor y actividades extraescolares de una gran calidad. Ha cuidado de todos, alumnos, maestros, padres, limpiadoras, conserje, dando siempre ejemplo y resolviendo cualquier problema de una manera ejemplar. Además, compaginándolo todo con la familia y siendo una gran investigadora de campo en el área del folclore musical. Gracias por ser un ejemplo a seguir.

A David Rizo con el que he estado todos estos diez años trabajando juntos y del que he aprendido muchísimo. Por toda su paciencia y dedicación, por la realización de la implementación del software y por las innumerables reuniones que hemos tenido y que han sido, a lo que la armonía es para la música, los pilares de esta tesis. Pero, además, por ser la grandísima persona que es, por confiar siempre en mí y apoyarme en los momentos difíciles.

---

Ha sido un placer investigar todos estos años junto a todos y cada uno de los que formáis del Departamento de Lenguajes y sistemas Informáticos, espero poder continuar formando parte de este gran departamento.

Además mi agradecimiento a mis amigos personales José, Paco, Lorenzo, Pablo, Trino, Julia, Mar, Juani, y a sus respectivas familias.

A mis primos Juan Pablo, Santiago, Emilio y Heri, por ayudarme y escucharme sobre todo en los malos momentos y confiar siempre en mí. A mis tíos y tías Mercedes, Isabel, Susi, Emilio, Santiago y Pedro.

A mis padres y mi hermana Marisa por estar siempre ayudándome, cuidándome, y preocupándose por mí. Son unos grandes pilares y ejemplo a seguir. Os quiero.

A mi exmujer Mari Carmen que, aunque en la actualidad creo que posee una actitud muy equivocada, he pasado unos años muy buenos con ella y, sobre todo, me ha dado lo más preciado del mundo, mis hijos.

Y sobre todo, a lo más preciado que tengo en este mundo, mis hijos. Mi princesita Adni, que es la mas guapa del mundo e inteligente y, aunque esto lo digo yo, su pediatra, que tiene muchos años de experiencia, nos relató que es la niña más inteligente que ha tratado. Mi queridísimo Placi que es un espejo mío, un gran futbolista, un gran estudioso pero sobre todo una buenísima persona y a mi pequeñín, Álvaro, que le encanta también el fútbol al que también juega muy bien, y que es el niño más cariñoso del mundo. Os quiero.

A todos y a cada uno, muchísimas gracias.

# Índice general

<b>Índice general</b>	<b>IX</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>XIII</b>
<b>Índice de cuadros</b>	<b>XVII</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Análisis: concepto y clasificación . . . . .	3
1.2. Finalidad y cuestiones de investigación . . . . .	8
1.3. Estado del arte . . . . .	10
1.3.1. Segmentación . . . . .	11
1.3.2. Enfoques basados en el conocimiento y estadísticos . . . . .	11
1.3.3. Análisis melódico . . . . .	13
1.3.4. Interactividad . . . . .	14
1.3.5. Enfoques más relacionados con el sistema propuesto . . . . .	15
<b>2. Breve evolución histórica del análisis</b>	<b>25</b>
2.1. Inicio hasta final del Barroco Musical (1750) . . . . .	25
2.2. Del Clasicismo al primer Romanticismo (1750-1840) . . . . .	28
2.3. La continuación del Romanticismo. De 1840 a 1900 . . . . .	32
2.4. Conciencia histórica durante el Romanticismo . . . . .	34
2.5. Principios del siglo XX. La Reducción y el Individualismo . . . . .	36
2.6. 1920-1945. Teoría de tensiones y niveles estructurales . . . . .	38
2.7. Disentimiento del empirismo . . . . .	41
2.8. 1945-1960. Unidades lingüísticas, cibernéticas y temáticas . . . . .	42
2.9. 1960-1975. Teoría de conjuntos y ordenadores . . . . .	44
2.10. Desde 1975. Gramáticas musicales . . . . .	47
<b>3. Análisis tonal</b>	<b>51</b>
3.1. Introducción . . . . .	51
3.1.1. Enfoque computacional propuesto para el análisis tonal . . . . .	52
3.2. Etiquetado de notas o análisis melódico . . . . .	53
3.2.1. Definiciones . . . . .	55
3.2.2. Duración rítmica mayor que un pulso (un tiempo) . . . . .	59
3.2.3. Duración rítmica igual que un pulso (un tiempo) . . . . .	64
3.2.4. Primer tiempo . . . . .	66
3.2.5. Segundo tiempo . . . . .	67
3.2.6. Tercer tiempo . . . . .	67
3.2.7. Cuarto tiempo . . . . .	69
3.2.8. Nota con valor de pulso que comienzan a contratiempo . . . . .	69
3.2.9. Duración rítmica menor que un pulso (un tiempo) . . . . .	70
3.2.10. Segunda parte del subtiempo . . . . .	72

## ÍNDICE GENERAL

---

3.2.11. Tercera parte del subtiempo . . . . .	72
3.2.12. Cuarta parte del subtiempo . . . . .	73
3.2.13. Grupos irregulares . . . . .	75
3.2.14. Equivalencias para el resto de compases . . . . .	75
3.2.15. Implementación del sistema de reglas de análisis melódico . . . . .	76
3.3. Obtención de la Tonalidad . . . . .	78
3.3.1. Detección aislada de la tonalidad . . . . .	79
3.3.2. Análisis de alteraciones para la detección de la tonalidad . . . . .	82
3.4. Análisis acórdico . . . . .	83
3.4.1. Funciones Tonales . . . . .	84
3.5. Grafo para la obtención del mejor análisis posible . . . . .	86
3.5.1. Cadencias: pesos del grafo . . . . .	89
3.5.2. Análisis melódico ulterior . . . . .	92
3.6. Experimentos . . . . .	92
3.6.1. Discusión cualitativa de los resultados . . . . .	93
3.7. Conclusiones sobre el sistema de análisis tonal . . . . .	98
<b>4. A. melódico con aprendizaje computacional</b>	<b>101</b>
4.1. A. melódico mediante reconocimiento de patrones clásico . . . . .	101
4.1.1. Aprendizaje a partir de vectores de características . . . . .	103
4.1.2. Programación lógica inductiva . . . . .	105
4.2. Experimentos . . . . .	106
4.3. Conclusiones . . . . .	109
<b>5. Análisis melódico interactivo</b>	<b>111</b>
5.1. Análisis melódico mediante IPR . . . . .	112
5.1.1. Aprovechamiento de la retroalimentación . . . . .	113
5.1.2. Adaptación del sistema a partir de la retroalimentación . . . . .	113
5.1.3. Retroalimentación y propagación . . . . .	115
5.2. Método . . . . .	115
5.3. Definiciones . . . . .	116
5.3.1. Reglas de restricción . . . . .	116
5.4. Prototipo de aplicación . . . . .	117
5.4.1. Modo manual . . . . .	118
5.4.2. Modo automático . . . . .	120
5.4.3. Modo asistido . . . . .	121
5.4.4. Análisis de la interacción del usuario . . . . .	122
5.5. Experimentos . . . . .	122
5.5.1. Prueba de concepto: capacidad para aprender interactivamente . . . . .	123
5.5.2. Configuración experimental y datos . . . . .	124
5.5.3. Resultados . . . . .	124
5.6. Conclusiones . . . . .	127
<b>6. Conclusiones, contribuciones y trabajo futuro</b>	<b>129</b>

<b>A. Anexo I</b>	<b>133</b>
A.1. Coral 25 analizado . . . . .	133
A.1.1. Grafo del coral 25 analizado . . . . .	145
<b>B. Anexo II</b>	<b>147</b>
B.1. Análisis de reglas generadas con RIPPER . . . . .	147
B.2. Análisis de reglas generadas con ILP . . . . .	157
<b>C. Anexo III</b>	<b>163</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>165</b>

# Índice de figuras

1.1. Ejemplos de cromatización ascendente y descendente. . . . .	17
1.2. Comparación del nivel mínimo de detección de la sonoridad entre Taube y nosotros . . . . .	20
1.3. Relaciones acórdicas para la determinación de la tonalidad. . . . .	22
3.1. Ejemplo de análisis tonal (Czarnecki, 2014). . . . .	52
3.2. Gráfico representativo del diseño del motor para la realización del análisis de una partitura. . . . .	54
3.3. Árboles con sus respectivas ramificaciones, binarias y ternarias. . . . .	56
3.4. Excepciones de la regla RL_1.1, diferenciando entre el retardo y la apoyatura. . . . .	59
3.5. Retardo ascendente. . . . .	60
3.6. Apoyatura. . . . .	60
3.7. Ejemplos excepcionales de notas extrañas con un valor rítmico superior al pulso. . . . .	61
3.8. Desdoble rítmico de la nota siendo la primera parte real y la segunda retardo en un ritmo armónico de blancas. . . . .	61
3.9. Armonía oblícua justificándose como desdoble rítmico de la nota, siendo la primera parte anticipación y la segunda parte real en un ritmo armónico de blancas. . . . .	61
3.10. Nota real por tener un intervalo melódico anterior y/o posterior superior a la segunda. . . . .	61
3.11. Nota real en un ritmo armónico de redondas. . . . .	62
3.12. Nota real en un ritmo armónico de blancas . . . . .	62
3.13. Nota real por ser el intervalo anterior superior a una segunda. . . . .	62
3.14. Ejemplos de retardo ( <i>suspension</i> (S) y apoyatura. La nota real se indica con la inicial h ( <i>harmonic tone</i> ). . . . .	63
3.15. Primera sección de la nota como real en un ritmo armónico de redondas. . . . .	63
3.16. Nota común entre dos armonías, analizando el cuarto tiempo y con un valor rítmico global superior al pulso. . . . .	64
3.17. Desdoble rítmico de la nota siendo la primera parte nota real y la segunda retardo. . . . .	64
3.18. Desdoble rítmico de la nota, siendo la primera parte una anticipación. . . . .	64
3.19. Notas extrañas explicadas por pertenecer a una <i>cambiata</i> o <i>Fux</i> . . . . .	65
3.20. Doble bordadura en un ritmo armónico de redondas. . . . .	65
3.21. apoyatura en un ritmo armónico superior al pulso y cumpliendo las dos condiciones de la regla RQ_1.2 . . . . .	66
3.22. apoyatura en un ritmo armónico superior al pulso cumpliendo únicamente la segunda condición de la regla RQ_1.2. . . . .	66
3.23. Nota a determinar dependiendo del ritmo armónico. . . . .	67
3.24. Nota real con un salto melódico posterior superior a una segunda. . . . .	67
3.25. Nota real con un nivel de confianza NC.4. La armonía y/o el ritmo armónico determinarán el carácter de la nota. . . . .	67



## ÍNDICE DE FIGURAS

---

3.26. Nota cromática. . . . .	68
3.27. Nota real ya que el valor rítmico anterior es inferior a la nota a analizar. . . . .	68
3.28. Nota de paso en un ritmo armónico superior al pulso. . . . .	68
3.29. Nota real ya que el intervalo que le precede es superior a la segunda. . . . .	69
3.30. Nota real porque el ritmo anterior es inferior al ritmo de la nota que se analiza. . . . .	69
3.31. Desdoble del ritmo de negra a dos corcheas ligadas . . . . .	69
3.32. Desdoble del valor rítmico siendo el primer valor real y el segundo retardo. . . . .	70
3.33. Desdoble rítmico siendo la primera corchea una anticipación y la segunda real. . . . .	70
3.34. Esquemas de estabilidades rítmicas según la posición que ocupe la nota en el compás. . . . .	71
3.35. Esquema numérico de estabilidades rítmicas de cada nota con respecto a las demás notas dentro del compás, en corcheas, siendo “1” la nota más estable y “8” la nota más inestable del compás. . . . .	71
3.36. Ejemplos de apoyaturas. . . . .	71
3.37. Nota de paso en la segunda semicorchea del primer tiempo ubicada dentro de un mismo entorno rítmico. . . . .	72
3.38. Nota de paso en un entorno rítmico superior. NC.1. . . . .	72
3.39. Nota real justificada por tener un intervalo melódico anterior superior a la segunda. . . . .	73
3.40. La excepción de la regla se produce en una <i>Cambiata</i> o <i>Fux</i> . . . . .	73
3.41. Excepción de la regla siendo en este caso nota extraña por ser una <i>cambiata</i> . . . . .	73
3.42. Nota real por tener un entorno rítmico inferior a la nota analizada. . . . .	73
3.43. Distintas opciones producidas en el cuarto subtiempo. . . . .	74
3.44. Nota extraña por llegar a la nota anterior a la analizada por salto y a la nota analizada por movimiento de segunda. . . . .	74
3.45. Notas reales por tener un entorno interválico melódico superior a la segunda. . . . .	75
3.46. Nota extraña ubicada en el segundo subtiempo del tresillo y teniendo un entorno interválico no superior a la segunda . . . . .	75
3.47. Nota extraña porque el intervalo anterior es de segunda y el anterior al anterior es por salto . . . . .	76
3.48. Notas reales deducidas por estar ubicadas en un entorno rítmico inferior a la nota analizada. . . . .	76
3.49. Reducción obtenida por el sistema de un acorde de cuatríada a un acorde díada. . . . .	83
3.50. Ejemplo de extracción de un acorde. A partir de las notas en la ventana (izquierda), se construye el conjunto de nombres de notas (centro) y se calculan todas las combinaciones (derecha) filtrando aquellas que no cumplen la condición (3.1) (combinaciones tachadas). . . . .	86

3.51. Salida del análisis para un compás. La primera fila bajo del pentagrama “Analysis” muestra el grado tonal, la segunda fila nos indica la función tonal, los números en la tercera fila indican el número de ventana y la tonalidad se muestra en la cuarta. . . . .	87
3.52. Ejemplo de grafo. Las aristas con peso 0 y aquellas que implican un cambio de tonalidad no se muestran por claridad. Las aristas con un valor $-\infty$ se muestran como líneas discontinuas. . . . .	88
4.1. Ejemplos de notas extrañas en un análisis melódico. Las notas no etiquetadas en esta partitura son reales. . . . .	102
4.2. Predicados de entrenamiento ILP. . . . .	106
4.3. Predicados objetivo ILP. . . . .	106
5.1. Enfoque IPR del proceso de análisis y su correspondiente evaluación, tanto para el sistema autónomo, como para el interactivo. . . . .	114
5.2. Sonoridad resaltada y aplicación del acorde y tonalidad seleccionados . . .	119
5.3. Diálogo que permite aplicar un acorde no presente en la lista de acordes propuesta. Usada para asignar tonalizaciones y dominantes secundarias.	120
5.4. Botón que etiqueta como reales todas las notas no etiquetadas anteriormente. . . . .	120
5.5. Resalte de la sonoridad y aplicación del acorde y tonalidad seleccionada. .	121
5.6. Evolución de la tasa de error conforme el usuario analiza obras. El eje $x$ representa el orden de la lista de obras en que ésta se analiza. La gráfica muestra la media (línea gruesa) del resultado de 100 ordenaciones distintas del corpus de entrada. Se muestra también la desviación típica. La tasa de error se mide como el número de interacciones requeridas para corregir una pieza dividido por el número de notas que contiene. . . . .	125
5.7. Resultados en términos del número de interacciones necesarias para solucionar el análisis melódico. Los porcentajes se obtienen como el número de interacción dividido por el número de notas . . . . .	126

# Índice de cuadros

3.2.	Cuadro de obtención de la tonalidad a partir de las notas alteradas. . . .	80
3.3.	Escalas diatónicas para la Definición 3.3.2. En el cuadro se representan todos los semitonos válidos desde la tónica. el valor (1) hace referencia al Napolitano y el valor (4) representa la tercera de Picardía, al final de la obra. . . . .	83
3.4.	Funciones tonales de los acordes. . . . .	84
3.5.	Cadencias. . . . .	89
3.6.	Las relaciones entre las funciones tonales dentro de la misma tonalidad y sus correspondientes pesos. Los pesos de la relación $D \rightarrow T$ dependen de las características de los acordes que forman estas funciones tonales. . . .	91
3.7.	Comparación de tasas de acierto (en %) para el sistema utilizando ponderaciones fijas (“pesos empíricos”) y el sistema con pesos aprendido por el algoritmo genético (“pesos genéticos”). G: Grado; FT: función tonal; T: Tonalidad. . . . .	93
4.1.	Valores de inestabilidad expresados como una función de la posición del ataque de la nota para los diferentes compases en resolución de semicorchea.	104
4.2.	Tasas de acierto de análisis melódico . . . . .	107
4.3.	Análisis tipo escala Likert de las reglas. La regla que ejemplifica el la línea <i>De acuerdo</i> necesitaría la condición <i>nextInterval = 2</i> para estar totalmente correcta. La regla para <i>Ni de acuerdo ni en desacuerdo</i> , contiene cláusulas irrelevantes ( <i>nextIntervalMode = MAJOR</i> ), y por el contrario, falta <i>nextInterval = 2</i> y el factor de inestabilidad debería reducirse. Respecto a la regla <i>En desacuerdo</i> , es irrelevante porque es totalmente ambigua . . . . .	108
5.1.	Plantillas de acordes. Los semitonos del primer tono corresponden a los semitonos desde la tónica del acorde. . . . .	121
5.2.	Ejemplo de entradas de registro . . . . .	123

# 1

## Introducción

Según el diccionario, el análisis es un estudio efectuado con el objetivo de conocer, de distinguir las diversas partes de un conjunto, de un todo, con el objetivo de identificar o explicar las relaciones que entrelazan las unas a las otras. En su aplicación musical, la comprensión de dicha definición y su aplicación es muy compleja, por cuanto varía en función de lo que cada individuo busque en el hecho musical. De lo que no hay duda es que el análisis musical es el medio para profundizar y comprender verdaderamente una obra musical. Un correcto análisis musical es la herramienta adecuada para un músico para ser capaz de realizar una interpretación rigurosa y fiable de una composición musical.

Para el músico, realizar un buen análisis musical es esencial para poder hacer una interpretación rigurosa y fiable de una obra musical, tal y como el compositor quiso plasmarla. Además, también es muy importante para la enseñanza de la música y el resultado de los sistemas informáticos que realizan un análisis musical son muy relevantes como primer paso para las aplicaciones de recuperación de información musical (*Music Information Retrieval*, - MIR), incluyendo comparación de la similitud musical (de Haas, 2012; Raphael and Stoddard, 2004), reducción de canciones a una representación intermedia (Raphael and Stoddard, 2004), simplificación musical (Rizo, 2010), para la clasificación de géneros (Pérez-Sancho et al., 2009) el acompañamiento automático (Simon et al., 2008; Chuan and Chew, 2007), para la pitch spelling (Meredith, 2006a), composición algorítmica (Ulrich, 1977), armonización (Kaliakatsos-Papakostas, 2014; Suzuki and Kitahara, 2014; Raczyński et al., 2013; Feng et al., 2011; Pachet and Roy, 2000; Ebcioğlu, 1986), interpretación automática con expresividad (Ramírez et al., 2010), preparar datos para el análisis schenkeriano (Kirlin, 2009; Marsden, 2010), descubrimiento de la tonalidad (Temperley, 2004), o análisis de métrica (Temperley and Sleator, 1999a), por nombrar sólo algunos.

El análisis melódico, armónico y tonal son los elementos básicos para poder alcanzar un análisis musical óptimo. El análisis melódico nos indica las características estilísticas de una nota desde un punto de vista contrapuntístico y lineal. Por otro lado, la armonía se entiende como los pilares que sostienen toda la estructura musical, girando, todos ellos, en torno a un acorde eje al que se denomina tónica y que da nombre a la tonalidad. De tal manera que el análisis armónico y tonal, nos revela la evolución y funcionalidad acórdica en una obra.

Como expondremos en el capítulo del estudio del estado actual de este tema, actualmente existen multitud de sistemas que intentan realizar distintos tipos de análisis

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

---

musicales. Entre ellos, y en concreto, análisis tonal, solamente existe uno (Taube and Burnson, 2008) que aborda el problema desde una perspectiva docente musical, buscando no sólo obtener unas altas tasas de acierto sino intentando razonar al usuario las decisiones tomadas por su sistema. Sin embargo, como podremos ver, los errores cometidos por éste no hacen viable su utilización dentro del aula. En general, los sistemas automáticos para resolver plenamente esta tarea sin errores están actualmente lejos de ser viables con lo que en un análisis real es indudable que se necesita al experto humano para hacer correcciones a la salida con el fin de lograr un resultado final satisfactorio. Los sistemas interactivos permiten retornar al usuario un análisis de alta calidad y confianza basándose en el aprendizaje computacional y el reconocimiento de formas interactivo, proporcionando herramientas que han demostrado ser muy convenientes en otros contextos.

En este trabajo estudiaremos el análisis tonal asistido por ordenador, de forma que, además de ser un proceso útil para otras tareas de MIR, sirva como herramienta docente. Primero proponemos un sistema automático basado en reglas para realizar el análisis tonal completo. Encontrando límites al rendimiento de éste, profundizamos en otras posibilidades con una parte del análisis tonal: el análisis melódico, estudiando la aplicación de técnicas de aprendizaje computacional y de reconocimiento de formas interactivo que, a través de la participación del usuario en el proceso, hagan el sistema aplicable a una tarea docente.

Este documento se estructura de la siguiente forma:

- Primero introduciremos con detalle el concepto de *análisis musical* (sección 1.1).
- Con el objetivo de contextualizar el tipo de obras en las que vamos a aplicar el sistema propuesto y entender cuál debe ser su extensión, sintetizaremos la evolución del análisis musical a lo largo de la historia en el capítulo 2 a partir de la página 25.
- Revisaremos el estado de la cuestión, tanto del análisis tonal en sí, como de las propuestas sobre aspectos como análisis melódico e interactivo en la sección 1.3 (página 10). Éste se completará con un estudio comparativo minucioso entre el sistema propuesto y los dos más relevantes actualmente (sección 1.3.5 a partir de la página 15).
- Propondremos un sistema computacional de análisis tonal completo basado en reglas musicológicas en el capítulo 3 (página 51).
- A continuación investigaremos la aplicación de técnicas de extracción automática de reglas y su aplicación en el análisis melódico en el capítulo 4 (página 101).
- Finalmente, en el capítulo 5 (página 111), comprobaremos que este sistema basado en reglas alcanza un máximo inadecuado para la práctica docente, lo que nos obliga a buscar otras alternativas. Con el fin de estudiar distintas alternativas, nos centramos únicamente en el análisis melódico, y aplicamos técnicas de aprendizaje computacional y de reconocimiento de patrones interactivo, experimentando su uso dentro de un prototipo que será evaluado por alumnos reales.

### 1.1 Análisis: concepto y clasificación

---

La visión que hasta hace unos años se ha tenido del análisis como una mera identificación de esquemas es básicamente, al menos, incompleta. Si tomamos, por ejemplo, su acepción etimológica (del griego “descomposición”) podemos apoyar una concepción del análisis musical como herramienta de trabajo para el músico e incluso como disciplina de enseñanza en la formación musical, pero desde un punto de vista comprensivo. Es por eso que, básicamente, desde final del siglo XIX, momento en que el análisis como disciplina comienza a tomar auge, surgen diferentes técnicas de aplicación de análisis y variadas teorías al respecto.

Para [Bent \(1988\)](#), el análisis, como bien define en el capítulo I, página 1, de su libro titulado como tal “Análisis” es:

- “la resolución de una estructura musical que contiene elementos integrantes relativamente sencillos, y la investigación de las funciones de tales elementos dentro de dicha estructura. En este proceso, la “estructura” puede ser parte de una obra, una obra en su totalidad, un grupo de obras o un repertorio completo, ya escritas o ya transmitidas por tradición oral.”
- “(el análisis) ... es aquella parte del estudio de la música que toma como punto de partida la música en sí misma, más que los factores externos, y que tiene como objetivo la comprensión en los planos lingüístico, histórico y estético.”

Con la práctica y la experiencia, hemos aprendido de la importancia del análisis y del proceso práctico de examinar piezas de música a fin de descubrir, o decidir, cómo están hechas y de la fascinación que este hecho nos produce, pues como dice [Cook \(1989\)](#), en su introducción (página 2):

“cuando analizas una pieza de música la estás recreando para ti mismo y terminarás con el mismo sentido de la posesión que un compositor siente por una pieza que ha escrito. Analizar una sinfonía de Beethoven significa vivir con ella durante un día o dos, de forma muy parecida a la que vive un compositor con una obra en proceso de composición: despertándote y durmiendo con la música y desarrollando una especie de intimidad con ella que apenas puede ser conseguida de cualquier otro modo. Con el análisis experimentas un sentido vivo de comunicación directamente con los maestros del pasado, que puede ser una de las experiencias más estimulantes que la música tiene que ofrecer. Y desarrollas un conocimiento intuitivo sobre lo que se hace y lo que no se hace en la música, lo que es correcto y lo que no lo es, que excede tu capacidad para formular estas cosas en palabras o explicarlas intelectualmente. Esta clase de urgencia da al análisis un valor especial en la formación compositiva, en comparación con los viejos libros

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

---

de teoría y ejercicios estilísticos que redujeron los logros del pasado a un juego de normas pedagógicas y regulaciones. No me extraña, por tanto, que el análisis se haya convertido en la columna vertebral en la enseñanza de la composición.”

Forte (1995) nos viene a decir que una composición musical es esencialmente una estructura indivisible, un sistema completo, muy integrado, a menudo de gran complejidad. Por consiguiente, las tentativas de analizar tales estructuras a menudo son sospechosas, y con frecuencia mal entendidas, y lo que debería extraerse del análisis es después de todo, lo que extraemos de todos los instrumentos de estudio adecuados.

“Donde el análisis es sólo disección, donde no hay ningún conocimiento de sus valores ni de sus limitaciones, no podemos obtener ninguna verdadera ventaja y no debería esperarse. En un sentido muy definido, un análisis eficaz sintetiza, y esto proporciona nuevas perspicacias, que, en un proceso de reorganización y consolidación, conduce a un conocimiento mayor.”

Una razón para desconfiar de los esfuerzos analíticos es que la música es el único arte cuya naturaleza intrínseca está basada en la percepción auditiva y temporal. Es mucho más fácil hablar de lo que vemos en una pintura, por ejemplo, que sobre lo que oímos en una sinfonía, y la gran cantidad de crítica literaria y dramática anual testifica el hecho de que las artes visuales y verbales se prestan mejor a una crítica adicional, siendo ésta, incluso, más objetiva que la crítica musical. Pero esto no quiere decir que no se haya hablado libremente de la música. Por el contrario, tan pronto como se pellizó la primera cuerda o se sopló el primer sonido de un tubo abierto alguien ya habló o escribió sobre ello. De modo que se ha acumulado una literatura enorme sobre la música, y muchos nombres famosos, tanto en literatura como en música, han contribuido a ello.

Es evidente que hay distintas formas de hablar sobre la música, y que con frecuencia la gente que piensa que habla sobre música realmente hablan de algo asociado con ello, o simplemente expresan su opinión subjetiva sobre lo que ellos creen que identifica lo escuchado. Tenemos biografías, estudios de los textos de canciones y otros fenómenos concomitantes verbales, tratados sobre las capacidades y las características de los diferentes instrumentos, etc. Y de forma bastante extraña, cuanto más lejano es un tratamiento verbal de la música misma, más libre resulta desde la crítica y es más rápidamente aceptada.

Los análisis puramente musicales requieren tratar más directamente y rigurosamente con la música que lo que hacen cualquier otro tipo de tratamiento discursivo porque es más cercano a la música. El análisis, de hecho, es una parte de la teoría de música y tiene sus raíces en los trabajos de los teóricos medievales, mientras que la crítica de música y muchas fases de la musicología provienen de la crítica literaria, que tiene tradiciones completamente diferentes y objetivos probablemente diferentes, aunque éstos no estén siempre claros. Esto nos conduce a la pregunta más estrechamente ligada al objetivo del análisis. ¿Cuál, expresamente, es su entorno? ¿Cuáles son sus limitaciones y valores peculiares?

## 1.1. ANÁLISIS: CONCEPTO Y CLASIFICACIÓN

---

Para otros autores, el valor del análisis musical y los propósitos del mismo tienen tres puntos de vista. En el primero el análisis tiene su papel en la explicación, al revelar la microestructura bases de su percepción manifestando propiedades como la coherencia tonal en términos de características que pueden ser o no percibidas. Sería el análisis motivico de [Reti \(1965\)](#).

Una segunda visión del análisis encuentra su valor no en la explicación sino en el cultivo y enriquecimiento de escuchar en el oyente, haciendo que éste escuche la música de una nueva forma o comience a escuchar nuevas relaciones. Es el llamado análisis prescriptivo, ya que hace oír de otra forma o hace escuchar otras cosas.

Una tercera visión toma como su objeto de descripción la intención del objeto de la experiencia musical del oyente, y sobre todo en un objeto que normalmente, no es un producto de encuentro analítico sino algo que existe a priori, algo que los analistas iluminan o elucidan. Es el caso de [Lerdahl and Jackendoff \(1985\)](#) y su teoría generativa.

En definitiva, y brevemente, según afirma el propio [Forte \(1995\)](#), podemos resumir que el análisis no es ni una composición, ni un método de enseñar la composición; ni es una percepción, ni un modo de aprender a oír. Es una tentativa sistemática de obtener la información significativa sobre una estructura musical. Además, éste puede ser el camino más eficiente y eficaz posible de obtener la información sobre la estructura, la información que es fácil y suficientemente comunicable. Y la información obtenida puede ser utilizada de varios modos. Puede ayudar a la audición, aunque esto no sea pedagógico. Puede proporcionar perspicacias en la naturaleza de la música, que, reinterpretadas y absorbidas de modos diferentes, pueden estimular la creatividad, etc. Habría que ser totalmente consciente, sin embargo, de que el análisis de una obra es una abstracción de esa obra y no debe ser identificado con la obra misma, tampoco el proceso analítico se debería de comparar con procesos compositivos o auditivos.

Forte plantea una pregunta realmente interesante: ¿Pero el análisis es el único modo de obtener información significativa sobre la estructura?. Evidentemente, el análisis nos aporta una información sustancial sobre la estructura de la obra, que sería muy difícil adquirir si los únicos instrumentos son la intuición, los sentimientos, las sensibilidades, etc., instrumentos muy subjetivos para los que están generalmente en oposición al análisis técnico. Además, la información analítica es más fácilmente comunicable que las intuiciones y los sentimientos (que son muy difíciles de comunicar con exactitud), ya que los datos técnicos en cuanto a la estructura pueden ser presentados, examinados, elaborados, reexaminados, etc., con una cierta cantidad de flexibilidad y facilidad y ningún sacrificio del fenómeno concomitante de rigor. Se puede reconocer el dicho “intelecto contra intuición”, pero debemos indicar que el análisis en ningún momento sustituye o reemplaza a la intuición. Debemos de ver el análisis como un medio que nos proporciona un control y que establece unos criterios para nuestra intuición, sentimientos, etc.

Sigue Forte afirmando que el valor del análisis no está del todo restringido al nivel técnico. Se necesita un conocimiento adquirido de forma teórica para comprender y asimilar además de disfrutar de la música, de forma análoga a lo que ocurre con las demás



## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

---

artes. La información analíticamente obtenida afecta a todas la persona y deberían ser consideradas como partes de un modelo más grande de la actividad musical.

Una cuestión que merece la atención aquí mencionar es si el compositor estaría de acuerdo con lo que el análisis revela sobre su obra.

“Pero como el análisis no es la composición, entonces la composición no es el análisis.”

La lógica de su propia creación no es inmediatamente aparente al compositor, tampoco se espera que lo sea. Que los compositores no han sido especialmente articulados sobre sus propias obras resulta, por lo tanto, completamente comprensible. En el nivel discursivo están sujetos a las mismas faltas y limitaciones que los demás mortales. Además, a menudo, carecen de una cierta humildad necesaria hacia la estructura musical. Aunque Forte indique que “la composición no es el análisis”, en ningún momento se pretende que la composición sea análisis ni lo contrario. A este respecto se le puede contestar a Forte que el análisis, es un medio para adquirir el conocimiento y las destrezas que nos lleven a la realización de buenas composiciones, porque es el compositor el que debe controlar su intuición, y no la intuición la que controle al compositor, y el análisis es una de las herramientas que ayuda al compositor a tener el control total de su obra.

Es indiscutible que una persona sin intuición jamás podrá ser un buen compositor pero la diferencia entre un gran compositor y otro mediocre puede radicar en el estudio analítico que éste haga de las obras de otros compositores.

Aunque el análisis nos permita enfrentarnos directamente con piezas de música, éstas no desplegarán sus secretos a menos que sepas las preguntas que quieres que te respondan. Y es aquí donde entran los métodos analíticos. Por eso, lo primero que debemos de tener en cuenta a la hora de realizar un análisis es el concepto mismo del hecho analítico. Sólo de esa forma podremos encararlo con eficacia y aplicar una metodología adecuada. Ante todo, habría pues que discernir para qué proceso comprensivo realizamos dicho análisis, pues en función del mismo el carácter también variará según uno los supuestos que seguidamente exponemos.

- Para impartir una clase en según qué nivel educativo (conservatorio superior, conservatorio profesional, secundaria, primaria, academia, universidad -musicología, música, facultad de educación-).
- Para la interpretación.
- Para la comprensión de la misma en función de aspectos específicos y técnicos.
- Para la dirección de grupos instrumentales, orquestas, coros, etc.
- Por puro placer comprensivo de la música.
- etc.

## 1.1. ANÁLISIS: CONCEPTO Y CLASIFICACIÓN

---

Para adecuar nuestro análisis a según qué clase de enfoque se han ido creando un gran número de métodos analíticos (acercamientos), que a primera vista parecen muy diferentes, pero que la mayor parte de ellos, de hecho, hacen la misma clase de preguntas. Preguntan si es posible segmentar una pieza musical en una serie de secciones más o menos independientes. Preguntan cómo los componentes de la música se relacionan los unos con los otros, y qué relaciones son más importantes. Más expresamente, preguntan a qué distancia estos componentes derivan su efecto del contexto en el que se encuentran.

Por ejemplo, una nota dada tiene un efecto cuando es parte de un acorde X y un efecto completamente diferente cuando es parte del acorde Y; y el efecto del acorde X por su parte depende de la progresión armónica de la que forma parte. O, por ejemplo, un motivo particular puede ser no ser advertido en sí mismo, pero adquirir un significado interesante en el contexto de un movimiento dado en un conjunto. Si se puede calcular como ocurre esto, entonces se tiene un entendimiento sobre las obras de música que no se poseía anteriormente.

Ahora bien, considerar el análisis como un fin por sí mismo tampoco tiene sentido. El análisis no pretende ser un mero informe estadístico o descriptivo del hecho musical, sino que sólo adquiere significado en cuanto a un objetivo mayor: comprender para conocer. El análisis es simplemente la manera, un útil, un medio de acercarse a él: conocer el hecho musical a través de una posición crítica.

No hay que olvidar tampoco que la escucha y el análisis están interrelacionados. Sin escucha no puede haber análisis. Pero no cualquier tipo de escucha, sino una escucha “musical” exclusiva. Es decir, debemos de discernir entre escuchar y oír música. Oír música sin entender ni disfrutar de ésta no puede equipararse a escuchar música (entendiendo y disfrutándola).

El análisis va igualmente unido a la interpretación y a la creación musical. Sin duda, toda interpretación y creación exige un análisis. La cuestión de la interpretación es inherente a la música en cuanto el compositor no es el ejecutante. Ello implica dar valor a la interpretación como un elemento de análisis dentro de la globalidad del hecho musical. La fórmula común del s.XIX donde el compositor prescribe, el intérprete ejecuta (o interpreta) y el oyente percibe es una hipersimplificación de una relación mucho más compleja, como bien nos viene a decir [Rowell \(1985\)](#).

En definitiva, podemos afirmar que el análisis es la herramienta que nos sirve para intentar comprender el hecho musical en todos sus parámetros. Debemos pues como analistas, intentar llegar a esa comprensión por los medios con que contamos y aplicar de cada procedimiento analítico los recursos que más nos convengan para nuestra causa.

Desde la perspectiva de la inteligencia artificial, el interés de estudiar cómo una máquina es capaz de realizar una actividad intrínsecamente humana es una motivación por sí mismo ([Raphael and Stoddard, 2004](#)). Además, desde un punto de vista psicológico, la comparación de los análisis por un equipo con las realizadas por un experto humano puede aportar datos interesantes sobre el proceso de escuchar obras musicales ([Temperley and Sleator, 1999a](#)).

Desde el punto de vista computacional, los diferentes aspectos del análisis musical se han abordado desde la década de 1960 ([Forte, 1967](#); [Winograd, 1968](#); [Rothgeb, 1969](#)),

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

---

y se ha ido mantenido el interés en este aspecto hasta ahora. En los últimos años se han publicado varias tesis (licenciatura, master y doctorado) sobre este aspecto lo que subraya la importancia de esta área de estudio (Sapp, 2011; de Haas, 2012; Granroth-Wilding, 2013; Willingham, 2013; Mearns, 2013; Tracy, 2013).

La relevancia de un análisis musical depende de su finalidad: en la composición ayuda al autor a estudiar las diferentes opciones armónicas o por otro lado, dada una secuencia de acordes crear líneas melódicas. En el caso del análisis de una obra para la interpretación o la dirección ayuda a establecer el papel de cada nota con respecto a la estabilidad e inestabilidad. Para la enseñanza es una herramienta indispensable tanto para el estudiante, como para el profesor.

El análisis de una composición implica varios aspectos interrelacionados: análisis estético relacionado con el entorno del compositor influenciándole en la creación de su trabajo, análisis formal para identificar adecuadamente la estructura de la obra y los elementos que la constituyen, y finalmente el análisis tonal dónde se incluye el análisis armónico y melódico. El análisis armónico estudia la tonalidad y sus modulaciones, los acordes y las funciones tonales de éstos estableciendo las distintas regiones de tensión y distensión, de estabilidad e inestabilidad en una obra musical, mientras que el análisis melódico establece la importancia y el papel de cada nota en su contexto armónico.

### 1.2 Finalidad y cuestiones de investigación

---

Se ha observado, en los conservatorios superiores de música, que en estos últimos años el nivel de conocimiento de los alumnos en las materias de armonía, contrapunto y análisis ha descendido notablemente si se compara con alumnos de cursos anteriores.

Este trabajo estudia las características y las bases científicas y tecnológicas que un sistema computacional debería tener para el análisis melódico, armónico, tonal y funcional de los corales armonizados de J. S. Bach. Dicho sistema se concibe y analiza como un punto de partida para su extensión a otros tipos de música polifónica. Con este trabajo se pretende ofrecer a los alumnos de las materias mencionadas anteriormente una herramienta de ayuda, la cual sirva como complemento a las clases.

Gracias a la inclusión de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TICs) en la educación podemos disponer de un gran número de nuevos recursos técnicos para la mejora del proceso de enseñanza-aprendizaje. Las aplicaciones pedagógicas de este sistema informático son muy relevantes para el mencionado proceso de enseñanza-aprendizaje ya que posee una doble función. Por un lado, debido a que la ratio entre alumno y profesor ha aumentado en los últimos años (con la inclusión de los nuevos sistemas educativos) de forma muy considerable, cotejamos que en el “plan 66”<sup>1</sup> la ratio era de un alumno por profesor o como máximo de cinco alumnos por profesor y actualmente llega a ser hasta de quince alumnos por profesor, para el profesor es una herramienta muy eficaz de poder declinar correcciones y fluir más la evolución de la clase (evitando, por ejemplo, cuestiones que el sistema informático puede resolver al

---

<sup>1</sup>Decreto 2618/1966, de 10 de septiembre, sobre Reglamentación general de los Conservatorios de Música, publicado en BOE de 24 de Octubre de 1966

## 1.2. FINALIDAD Y CUESTIONES DE INVESTIGACIÓN

---

propio alumno). Por otro lado, puede servir de gran ayuda para el alumno ya que en cualquier momento este tipo de sistema informático es capaz de resolver algunas dudas que éste pueda tener, no teniendo que esperar a ir a clase para que sea el profesor el que le resuelva las dudas (debemos de indicar que en los conservatorios la clase se desarrolla una vez por semana), además este sistema informático, puede tener la capacidad de corregir algunos errores que el alumno cometa en su trabajo. El análisis melódico que se desarrolla trata de clasificar las notas que componen una melodía monódica o varias polifónicas en reales y extrañas, además y en base a este análisis y a otros parámetros se detecta la tonalidad, los acordes y la función tonal. Tanto el análisis melódico como la tonalidad, los acordes y la función tonal de cada acorde se obtienen del mejor resultado hallado en una triple conjunción: reglas lineales melódico-contrapuntísticas para la detección del análisis melódico, reglas interválicas-acórdicas para el análisis armónico y secuencia cadencial-funcional para la detección de la función tonal.

Fundamentándonos en estas reglas, desarrollamos un sistema informático que analiza automáticamente los corales armonizados de J. S. Bach. El sistema nos devuelve una partitura analizada melódicamente, y nos ayuda tanto tonalmente, incluyendo las modulaciones existentes dentro de la obra, como armónicamente y funcionalmente. Nuestra motivación se asienta en poner en manos de ese alumnado medios informáticos que les sirvan de asistencia adicional para las clases de armonía, contrapunto y análisis.

En este trabajo se establecen tres cuestiones de investigación, las cuales nos van a revelar unos objetivos. En primer lugar se hacen unas reseñas sobre la evolución del análisis desde su invención hasta todo lo que se desarrolla en torno al análisis-computacional, estableciendo el siguiente objetivo:

Realizar un estudio conciso sobre la evolución del análisis musical a lo largo de su historia. Desde el nacimiento hasta los últimos avances.

En el segundo bloque de investigación se pretende contestar a la cuestión: ¿Es posible realizar un programa informático que en base a las reglas establecidas en el segundo bloque analice de forma automática los corales armonizados de J. S. Bach? Dicho de otra manera: estudiar si es posible definir unas reglas armónicas, contrapuntísticas, tonales y funcionales que nos permitan hacer un programa informático que analice y describa tonalmente los corales armonizados de J. S. Bach, estableciendo los siguientes objetivos:

- Catalogar y jerarquizar las reglas melódicas y armónicas propias de la época barroca de forma que sean computables.
- Desarrollar y jerarquizar los entornos funcionales propios de la época barroca de forma que sean computables.
- Desarrollar unos sistemas computables para poder detectar la tonalidad y modulación de una obra con carácter barroco.

En el último bloque de investigación se estudiarán las premisas técnicas y los métodos que nos permitan implementar un programa que, en base a las conclusiones extraídas

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

---

del segundo bloque, analice los corales armonizados de Bach detectando la tonalidad y las modulaciones, los acordes, las funciones tonales y catalogando las notas como reales o extrañas. Estableciendo el último objetivo de investigación:

Diseñar e implementar un sistema informático que analice de forma automática e interactiva los corales armonizados de J. S. Bach.

El fin general, de este trabajo, es diseñar un instrumento para la docencia y aprendizaje del análisis, intentando, de esta manera, ayudar principalmente al alumnado en su proceso de aprendizaje. Es decir, el objetivo final de nuestro proyecto es crear las bases para la creación de un software interactivo que ofrezca una solución con las demandas mencionadas en el párrafo anterior y que, al mismo tiempo, mejore la educación en la teoría musical proveyendo (al igual que en (Taube and Burnson, 2008)):

- Ejercicios prácticos ilimitados con distintos niveles de enseñanza para el estudiante.
- Niveles personalizados dependientes del grado del alumno.
- Ejemplos en línea y bases de datos de ayuda.
- Enseñanza de ejemplos interactivos.
- Ejercicios de evaluación automáticos y generación de tareas personales.

### 1.3 Estado del arte

---

Recientemente se han publicado tres revisiones, no exhaustivas, del análisis armónico computacional (Kröger et al., 2010; de Haas, 2012; Mearns, 2013).

Hay dos tareas principales del análisis armónico que son recurrentes en la mayoría de las propuestas: primero la partición de la pieza en segmentos con importancia armónica, después la asignación de cada segmento a un acorde en un contexto tonal usando bien un enfoque académico con números romanos (p.ej. acorde de dominante V7), bien con una notación moderna (p.ej. un acorde como GMaj7).

Desde una perspectiva humana, un análisis no se puede realizar como una secuencia de tareas independientes (como, por ejemplo, primero un análisis de tonalidad primero, después un análisis de acordes, luego el melódico...). En general, la simultaneidad en la ejecución de estas fases puede depender de una obra musical en particular. En algunos casos todas las tareas se computan simultáneamente, mientras que en otras, para cada fase, se generan varias posibilidades para seleccionar luego la mejor solución usando una técnica de optimización. Por ejemplo, el análisis melódico condiciona las otras tareas, ayudando a descartar notas ornamentales que no pertenecen a la estructura armónica, para realizar decisiones sobre segmentación e identificación de acordes.

### 1.3.1. Segmentación

La partición de una pieza en segmentos con propiedades armónicas distintas (por ejemplo, tonalidad, acorde, función tonal), al que se refiere Sapp (2007) (página 102) como “uno de los problemas más desalentadores del análisis armónico”, ha sido abordado hasta ahora utilizando dos enfoques distintos: uno que podríamos llamar *ciego*, porque no usa ninguna información tonal a priori, y otro que tiene en cuenta alguna información tonal calculada desde el principio, denominada *island growing* (es decir, de *crecimiento de islas*), por Mouton and Pachet (1995). El enfoque *ciego* se basa sólo en información temporal dividiendo la entrada en pequeños trozos (Pardo and Birmingham, 2000; Barthélemy and Bonardi, 2001; Illescas et al., 2007), usando bien puntos de ataque y liberación de nota, bien una duración fija basada en la duración de la nota más corta de un compás o de la pieza completa. Tras ello, una vez se dispone de la información de la tonalidad y acordes tras la segmentación inicial, esos trozos se combinan, normalmente de izquierda a derecha, para construir segmentos con significado cuando son contiguos y comparten la misma tonalidad y acorde.

El método *island growing* busca centros tonales basándose en acordes evidentes, cadencias, o cualquier pista que permita asignar un acorde en un contexto tonal a un segmento dado. Una vez se han obtenido esos centros tonales, crecen de manera similar al enfoque *ciego*. Éste es el enfoque más habitual en la literatura (Scholz et al., 2005; Meredith, 1993; Sapp, 2007; Ulrich, 1977). Nótese que este método también necesita dividir horizontalmente el trabajo para poder asignar esos centros tonales, de forma que la distinción entre los enfoques *ciego* e *island growing* en algunos casos es difícil o no está totalmente claro.

Finalmente, como manifiestan Pardo and Birmingham (2002), hay enfoques que reciben una entrada ya segmentada (Winograd, 1968) o donde no está claro cómo se ha obtenido ésta.

### 1.3.2. Enfoques basados en el conocimiento y estadísticos

La identificación de acordes y tonalidades solas dados los segmentos ya calculados, o simultáneamente con el cálculo de esos segmentos, se ha realizado usando dos enfoques muy distintos: uno basado en reglas establecidas por expertos, en ocasiones denominadas *knowledge-based*, y otras construidas sobre sistemas estadísticos de aprendizaje computacional, acertadamente denominados por Chuan and Chew (2011) como *data-driven*.

No hay una evidencia experimental sólida de cuál de los dos produce mejores resultados de análisis, pero actualmente parece que se asume que los sistemas de aprendizaje computacional son más adecuados que los basados en el conocimiento (Chuan and Chew, 2011). Algunos sistemas usan una solución híbrida. No obstante, incluso los sistemas menos basados en conocimiento incorporan al menos alguna información a priori en la misma representación musical intermedia o en la estrategia de aprendizaje diseñada desde una solución guiada preconcebida. Algunas de ellas, incluso incluyen algunas reglas que restringen o dirigen los métodos estadísticos (Raphael and Stoddard, 2004).

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

---

Los métodos basados en el conocimiento fueron los primeros usados para abordar el problema. Se formularon usando sistemas de reglas de preferencia (Temperley and Sleator, 1999a; Temperley, 1997, 2001), usando un enfoque clásico *forward chaining* u otras soluciones típicas con sistemas expertos (Scholz et al., 2005; Pachet, 1991; Maxwell, 1984), como problemas de satisfacción de restricciones (Hoffman and Birmingham, 2000), embebidos en forma de gramáticas (Tojo et al., 2006; Winograd, 1968; Rohrmeier, 2007; de Haas, 2012), o usando métodos numéricos basados en plantillas. Estos métodos funcionan comparando el conjunto de alturas de entrada, que vienen desde el proceso de segmentación, con una lista de plantillas de posibles acordes. Usando una medida de similitud entre acordes, se ordena la lista de plantillas, y el algoritmo elige si la plantilla más similar es la seleccionada, o si pasa la lista a un proceso posterior que usa algún tipo de algoritmo (Taube, 1999b; Prather, 1996) o una técnica de optimización para encontrar la mejor secuencia de acordes por medio de un grafo (Pardo and Birmingham, 2002; Kirlin, 2009; Barthélemy and Bonardi, 2001; Illescas et al., 2007; Choi, 2011). En (Passos et al., 2009), el proceso de búsqueda se realiza usando la técnica de los  $k$ -vecinos más cercanos.

Los sistemas de aprendizaje computacional estadístico tienen, como su mejor ventaja, la capacidad de aprender de ejemplos, tanto supervisados a partir de corpora etiquetados o no supervisados, teóricamente superando el problema de la variabilidad de la gran cantidad de reglas aplicables. Podemos encontrar en la literatura casi tantas propuestas para este enfoque como técnicas de aprendizaje computacional: *HMPPerceptron* para solucionar un problema de aprendizaje supervisado secuencial *-supervised sequential learning* (SSL)- como aquellos usados en el etiquetado *part-of-speech* (análisis sintáctico) (Radicioni and Esposito, 2007)), modelos ocultos de Markov (Raphael and Stoddard, 2004; Passos et al., 2009; Mearns, 2013), o redes neuronales (Scarborough et al., 1989; Tsui, 2002a).

Ambos enfoques anteriores tienen ventajas y desventajas, como se ha hecho notar en diferentes estudios (Mouton and Pachet, 1995). La principal desventaja de los sistemas basados en reglas es la imposibilidad de incluir reglas para cualquier posible situación, y por tanto, no ser capaz de enfrentarse a cualquier género o compositor. De hecho, en muchas situaciones, los compositores intentan romper las reglas establecidas como herramienta creativa. Otra desventaja de esos enfoques es el hecho de que en muchos casos dos reglas diferentes pueden entrar en conflicto. Esta situación se ha solventado frecuentemente usando reglas de preferencia (*meta-reglas*) que solucionan esos conflictos. En (Raphael and Stoddard, 2004) se presenta otro problema: como los sistemas de reglas funcionan ordenando la secuencia de decisiones, la propagación de errores de una decisión temprana podría comprometer el resultado final. La principal ventaja es su capacidad de explicación en lenguaje humano de las decisiones tomadas por el algoritmo que puede ser usado para guiar al usuario en un enfoque interactivo o en un entorno educacional.

Para el caso de métodos numéricos, Raphael and Stoddard (2004) apuntan que los valores devueltos por el algoritmo de similitud de acordes son difíciles de justificar y funcionan sólo tras ajustar empíricamente el sistema. Para superar este problema, se han aplicado procedimientos estadísticos que ajustan automáticamente los parámetros

por métodos como programación lineal dinámica (Raphael and Nichols, 2008) o por algoritmos genéticos (Illescas et al., 2011), como proponemos más adelante en esta tesis.

Además de la segmentación y la identificación de acordes, hay detalles importantes que diferencian la profundidad de los diferentes trabajos en la bibliografía. Uno es la gestión de las modulaciones y las tonalizaciones. La modulación es el proceso por el cual el centro tonal es sustituido por otro. Normalmente, la tonalidad cambia a lo largo de la pieza completa. En muchos casos comienza por una tonalidad, modula a otras tonalidades y finalmente vuelve a la misma tonalidad inicial. El concepto de tonalización (Piston, 1987) se usa para describir la cadencia de la dominante secundaria sobre su propia tónica, de forma que, en una tonalidad dada, cuando hay una cadencia de la dominante de cualquier grado, este grado actúa como la tónica de la dominante secundaria que lo precede. Se puede consultar una descripción más detallada en las secciones 2.1.3 y 2.1.4 en (Tsui, 2002b), y la sección 2.2.5 en (Mearns, 2013).

Algunos métodos consideran esto sólo como un cambio de tonalidad ignorando este cambio temporal de contexto tonal (como mostraremos en el capítulo 3 y que publicamos en (Illescas et al., 2007)), otros reinterpretan el resultado en un post-proceso para adaptarlo a la interpretación correcta (Kirlin, 2009). Hay, sin embargo, muchos enfoques que incluyen este concepto explícitamente en sus modelos (Hoffman and Birmingham, 2000; Taube, 1999b; Scholz et al., 2005; Sapp, 2011; Rohrmeier, 2011).

### 1.3.3. Análisis melódico

El otro aspecto que es importante para nuestro trabajo es el análisis melódico. Ningún trabajo se ha centrado en profundidad sólo en el etiquetado melódico de una tarea de análisis armónico desde un punto de vista computacional. El primer intento fue realizado en el contexto del presente trabajo de investigación y publicado en (Illescas et al., 2011). Se puede encontrar un estudio musicológico en (Willingham, 2013). No obstante, muchos trabajos le dedican la atención que merece, como (Mearns, 2013; Sapp, 2007; Chuan and Chew, 2011), o al menos aceptan que una mejor comprensión de éste podría mejorar el proceso de identificación de acordes (Pardo and Birmingham, 2002; Raphael and Stoddard, 2004). En algunos métodos, se quitan las notas ornamentales en un preproceso manual previo con el objetivo de evitar la tarea del análisis melódico (Winograd, 1968). En muchos trabajos se eligen las notas basándose sólo en su posición métrica: notas en tiempos fuertes, o usando una separación o duración constante (Yi and Goldsmith, 2007). Otros métodos usan reglas muy simples (Barthélemy and Bonardi, 2001; Kirlin, 2009): asumen que a las notas extrañas les sigue un movimiento conjunto. En sistemas basados en reglas normalmente hay reglas que tratan específicamente con el análisis melódico, por ejemplo la “Ornamental Dissonance Rule” en (Temperley, 2001) o las reglas de la 10 a la 20 en (Maxwell, 1984). Finalmente, en (Taube, 1999b) se usa comparación con plantillas para resolver este problema.

Desde un punto de vista de aprendizaje computacional, se propusieron dos enfoques contemporáneos que funcionan prácticamente de la misma forma, uno propuesto en el contexto de la presente tesis (Illescas et al., 2011), que extenderemos en la presente memoria, y el módulo “Chord-Tone Determination” (Chuan and Chew, 2011). En ambos



## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

---

casos las notas son pasadas como un vector de características (hasta 73 en (Chuan and Chew, 2011); menor en número, pero similar en (Illescas et al., 2011)) a un clasificador basado en árboles de decisión que aprende las reglas para distinguir las notas reales de las extrañas en el caso de (Chuan and Chew, 2011), y las reales frente a cada tipo diferente de notas extrañas en (Illescas et al., 2011).

### 1.3.4. Interactividad

Uno de los aspectos de este trabajo que menor presencia tiene en la literatura es la capacidad de interacción entre los usuarios potenciales y este tipo de sistema. Algunos autores han expresado en algunos casos la necesidad de interactividad (Scholz et al., 2005) que es implícito en el concepto de análisis “asistido por ordenador” sugerido por Maxwell (1984). Sapp (2011) revisa los errores generados por su algoritmo, encontrando que algunas veces la tonalidad obtenida es errónea pero está muy cerca de la correcta. Desde un punto de vista clásico esto es un error, pero podría considerarse como una equivocación menor. Desde un punto de vista interactivo, esto se podría solucionar fácilmente ordenando las tonalidades al presentarlas al usuario. Phon-Amnuaisuk et al. (2006) califican su sistema como “plataforma para la representación del conocimiento musical incluyendo reglas de armonización para permitir al usuario controlar el comportamiento de armonización del sistema.” Este “control de usuario” es, de hecho, un proceso interactivo. Algo similar afirma Taube (1999b): “el usuario podría controlar directamente muchos aspectos del proceso analítico”.

Algunos autores han expresado su intención de añadir un interfaz interactivo de usuario. Éste es el caso de Chuan and Chew (2010), quienes presentan un diseño preliminar. Para una tarea de armonización, en (Simon et al., 2008), los autores añaden una posible interacción que permite al usuario elegir entre los tipos de acordes generados. En un entorno docente, el sistema “Choral Composer” (Taube and Burnson, 2008) permite a los usuarios ver sus errores conforme realizan cada ejercicio (*guided completion*).

Como una forma visual de representar el análisis, “MuSA.RT, Opus 1” permite visualizar la obra analíticamente usando el modelo *Spiral Array* (Chew and Francois, 2003). Choi (2011) cita un interfaz gráfico de usuario denominado “T2G”.<sup>2</sup>

Tal como afirman los autores, “ImproVisor”<sup>3</sup> es un programa de notación musical diseñado para ayudar a los músicos de jazz a componer y escuchar solos parecidos a como se deberían improvisar. El sistema, construido sobre gramáticas aprendidas a partir de transcripciones, muestra consejos de improvisación en forma de pistas visuales.

Finalmente, no interactivo pero visual, el sistema “Rameau” (Passos et al., 2009) permite experimentar con ideas musicológicas con un interfaz gráfico, y Sapp (2011) genera gráficos llamados “keyscapes” que permiten el análisis visual de obras musicales.

El paradigma del reconocimiento de patrones interactivo (*interactive pattern recognition* - IPR) no se ha aplicado al análisis tonal hasta ahora. No obstante, muchas

---

<sup>2</sup><http://members.shaw.ca/akochoi-T2/jazz-harmonic-analysis/index.html>

<sup>3</sup><http://www.cs.hmc.edu/~keller/jazz/improvisor/>

de las conclusiones al analizar los análisis realizados por herramientas informáticas (véase por ejemplo el análisis manual de errores en (Pardo and Birmingham, 2002)) se podría incorporar a un modelo interactivo. Cualquier enfoque *data-driven* puede asimismo beneficiarse de un enfoque IPR. Sin ser directo, añadir las decisiones del usuario como reglas específicas al modelo (similarmente a como se hace en el paradigma del razonamiento basado en casos (Sabater et al., 1998)) podría ser una forma de aprovechar la retroalimentación del usuario.

Actualmente no existe un *ground truth* estandarizado o un método estandarizado *de facto* de técnicas de evaluación comunes usadas por distintos autores, solamente algunos métodos comparan sus resultados de manera aislada. No obstante, parece que las “corales armonizadas” de J.S. Bach son el corpus más usado entre ellos (Radicioni and Esposito, 2007; Tsui, 2002a; Maxwell, 1984; Illescas et al., 2011, 2008, 2007), quizás porque son el corpus más escolástico disponible, donde la mayoría de los analistas pueden coincidir en sus análisis.

En relación a las técnicas de evaluación, no hay un acuerdo en una medida de evaluación cuantitativa a ser usada para comparar la eficacia de las diferentes propuestas. De cualquier forma, como detallaremos más adelante, bajo el paradigma del reconocimiento de formas interactivo que usaremos aquí, se asume que los sistemas no son totalmente automáticos sino que requieren de la supervisión de los usuarios. La evaluación cuantitativa se orienta menos a la precisión y más al esfuerzo del usuario, es decir, el número de interacciones del usuario, que se requieren para conseguir una salida totalmente correcta.

### 1.3.5. Enfoques más relacionados con el sistema propuesto

Actualmente, desde la perspectiva computacional, existen dos estudios primordiales en la realización de análisis armónico, tonal y contrapuntístico. Por un lado está el escrito de Temperley and Sleator (1999b) y por otro el de Taube (1999a).

Temperley and Sleator (1999b) en su artículo “Modeling Meter and Harmony: A Preference-Rule Approach” indica que los ordenadores pueden realizar diferentes tareas relacionadas con la música como por ejemplo reproducir una partitura musical, detectando probables errores en la partitura, buscando secuencias melódicas, generando un acompañamiento para una melodía, o realizando el análisis estadístico de estilos musicales.”

En ese artículo, Temperley y Sleator, presentan un sistema computacional para analizar una estructura métrica y armónica de una obra musical tonal occidental del periodo clásico. La diferencia de este sistema respecto a otros radica en que está basado en reglas preferentes, las cuales determinan el mejor análisis de entre varios posibles.

Utilizan dos sistemas de reglas de preferencia: un modelo basado en el modelo GTTM (Lerdahl and Jackendoff, 1985) para el análisis métrico-rítmico (a partir de ahora GTTM-T) y el modelo de armonía para la detección de los acordes.

La entrada musical al programa está constituida por una doble información: recopilan las alturas de las notas en valores MIDI y el valor métrico en medidas de tiempo

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

---

(milisegundos). Temperley y Sleator indican que no necesitan ninguna información adicional como líneas de compás, armadura, notación rítmica y nombre de las notas.

Este modelo tiene una gran desventaja desde el punto de vista analítico ya que la falta de información es sustancial a la hora de analizar con rigurosidad: el sistema de Temperley y Sleator es incapaz de distinguir enarmonías, es decir no podría distinguir por ejemplo un acorde de Do mayor y otro de Si $\sharp$  mayor.

En el ejemplo de análisis métrico de la obra “Ah Susannah” Temperley no explica cómo detecta la anacrusa. Además tampoco queda explicado por qué realiza una periodización rítmica cada dos compases. Aunque el sistema GTTM-T analiza sin necesidad de conocimiento de compás, según parece, en el ejemplo de “Ah Susannah” existe una relación entre el análisis que realiza y el compás. Tampoco queda determinado este punto. Aún así, se puede deducir que el análisis rítmico de dicha obra sea una consecuencia de “la regla del evento” (“Event rule” como denominan Temperley y Sleator). De ser así, también se puede deducir que la secuencia rítmica que detecta está más ligada a un compás cuaternario que binario, ya que la importancia que le da a todas las negras con puntillo y a las blancas siempre es menor que otras duraciones rítmicas como la corchea.

Temperley y Sleator indican que la regla más importante consiste en que los pulsos (especialmente los de nivel más alto o los de tiempo fuerte) deberían de coincidir en lo posible con inicios de eventos. Además tienen una regla de preferencia para pulsos fuertes, los cuales deben de coincidir con eventos (supuestamente rítmicos) más largos denominada “Length rule”.

La última regla que tienen dentro del modelo GTTM-T hace referencia a la regularidad rítmica y la denominan “regularity rule”. Con esta regla realizan la cuantificación y encuentran la medida rítmica en un solo proceso.

Para el modelo armónico, al igual que ocurre con el modelo rítmico, se basan en un diagrama de pianola teniendo una entrada de eventos compuestos de alturas de notas con un tiempo y duración para cada nota.

Quizás la palabra armonía está mal empleada en este contexto, ya que la armonía es una interrelación de acordes entre sí, girando en torno a un acorde eje que se denomina tónica. Temperley y Sleator realmente lo que implementan en este trabajo es la detección de un acorde, en lo que ellos denominan términos absolutos:

*“The current program simply labels roots in absolute terms.”*

El análisis armónico (acórdico) que implementan se realiza segmentando la obra y etiquetando cada segmento con un acorde. La utilización de la nomenclatura acórdica anglosajona (americana) para la detección del acorde implica que en realidad no realiza un análisis tonal de la obra.

Temperley y Sleator para detectar el acorde de una línea melódica, utiliza varias reglas: regla de la compatibilidad, regla de la disonancia ornamental, regla de la variación armónica, regla de la variación de altura y regla del pulso fuerte.

La regla de la compatibilidad elige fundamentales que tienen relación con la tónica. Las siguientes relaciones son las que prefiere: 1, 5, 3, 3, 7, 5, 9, ornamental.

### 1.3. ESTADO DEL ARTE

La regla de la disonancia ornamental determina que un evento es un adorno cuando, estando en un tiempo débil, su relación con el siguiente evento es de medio tono o de tono entero. Esta regla, al parecer, no determina las notas extrañas colocadas en tiempos fuertes o semifuertes, de tal forma que las notas que recaen en estos tiempos (fuertes y semifuertes) son consideradas en su totalidad como notas reales.

Para la elección de un acorde, Temperley y Sleator se basan en la secuencia de la serie de quintas, donde la preferencia del acorde es directamente proporcional a la cercanía en la serie. Este sistema lo denomina la regla de la variación armónica.

De forma análoga al párrafo anterior, determinan la relación de alturas de las notas en base al círculo de quintas, denominando esta regla como la regla de la variación de altura. Recordemos que la entrada al programa es mediante la pianola, por lo tanto, para determinar la enarmonización de la nota se basan en el criterio de la serie de quintas. El criterio de detección que utilizan es bastante notable, no obstante, no especifican como difieren la secuencia cromática. Por ejemplo, si utilizamos una secuencia cromática ascendente entre Do y Re, por lo general, la nota cromática es Do $\sharp$ ; por el contrario, se la secuencia cromática es descendente (de Re a Do) la nota cromática es Re $\flat$  (Fig. 1.1).



Figura 1.1: Ejemplos de cromatización ascendente y descendente.

Por último, con la regla del pulso fuerte se determina que un acorde debe de comenzar en un tiempo fuerte. La obra se segmenta y se elige una fundamental para cada segmento. Los acordes utilizados están etiquetados por su fundamental. La longitud del acorde se determina por el grupo de segmentos continuos con la misma fundamental. El programa armónico considera todos los análisis posibles de una obra.

La conclusión que se adquiere del trabajo de Temperley y Sleator para nosotros, es principalmente, su sección armónica. En nuestro trabajo el nombre de las notas se obtiene directamente, ya que se utiliza el formato MusicXML, con lo que su primera sección no se relaciona con este trabajo. En cuanto al sistema de armonización que utiliza, para nosotros, es bastante elemental, siendo práctico para la música *pop* (donde solamente se utilizan secuencias armónicas muy básicas) pero ineficaz para la música clásica o culta.

El segundo escrito, y probablemente el más interesante desde nuestro punto de vista, es el artículo de Heinrich Taube llamado “Automatic Tonal Analysis” (Taube, 1999a). En este trabajo, el autor analiza corales de J. S. Bach e identifica los acordes de triada, los acordes de séptima, el estado del acorde, notas extrañas a la armonía y su clasificación, la tonalidad, las cadencias, análisis armónico funcional y descubre anomalías estilísticas. Para trabajos futuros expone además la capacidad de analizar estilos diferentes.

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

---

La motivación que lleva a Taube es idéntica a la nuestra. En su *abstract* nos viene a decir que el programa de análisis que implementa proporciona la base para la realización de un entorno interactivo entre el ordenador y el estudiante o investigador. Este *software* apoya la instrucción de aula y la práctica individual en armonía, contrapunto y análisis.

Las observaciones generales que Taube advierte, aunque él mismo reconoce que no son científicas sino basadas en su propia experiencia y en la de sus compañeros, fundamenta que el alumnado actual (comparándolo con los de quince años atrás) de primer curso entra en la universidad con menos preparación en teoría de la música, además la carga de enseñanza total sobre el profesorado ha aumentado y hay muchas más opciones de asistentes de enseñanza en la teoría musical. En el Conservatorio Superior de Música de Murcia “Manuel Massotti Littel” donde soy profesor entre otras asignaturas de armonía, contrapunto y análisis, también se ha observado notablemente, tanto por mí como por mis compañeros, que el nivel de conocimiento del alumnado ha descendido de forma drástica, y aunque Taube realiza la comparación con hace unos quince años, nuestra comparación es mucho más reciente, unos seis años. Desafortunadamente, el nivel de conocimiento del alumnado de primer curso es muy bajo, con lo que se tiene que bajar el nivel de enseñanza considerablemente. Por suerte tenemos medios audio-visuales y computacionales que hace unos pocos años no teníamos. Al igual que Taube, nuestra motivación se asienta en poner en manos de ese alumnado medios informáticos que les sirva de asistencia adicional para las clases de armonía, contrapunto y análisis.

El objetivo final de su proyecto es crear un *software* interactivo que ofrezca una solución con las demandas mencionadas en el párrafo anterior al mismo tiempo mejorando la educación en la teoría musical proveyendo:

- Ejercicios prácticos ilimitados con distintos niveles de enseñanza para el estudiante.
- Niveles personalizados dependientes del grado del alumno.
- Ejemplos en línea y bases de datos de ayuda.
- Enseñanza de ejemplos interactivos.
- Ejercicios de evaluación automáticos y generación de tareas personales.

El sistema de Taube permite al estudiante la libertad de perseguir sus impulsos creativos al mismo tiempo proporciona un análisis crítico, explica cuando y el por qué se equivoca y proporciona ejemplos. Su sistema se evaluó con los corales armonizados de J. S. Bach. Principalmente elige los corales porque son composiciones cortas muy complejas que proporcionan una variedad de desafíos analíticos. Además, están escritos a cuatro voces y son totalmente rigurosos desde el punto de vista armónico y contrapuntístico.

Taube indica que, aunque el sistema se ha probado con los corales de Bach, este *software* podría analizar cualquier estilo de composición, también el *software* puede generar información que sirve como plantilla para la realización de ejercicios por parte del estudiante y puede realizar de forma automática composiciones canónicas. Quizás aquí Taube exagera demasiado el potencial de su sistema, ya que para realizar un análisis

de un estilo musical se necesita implementar las reglas de dicho estilo. Por ejemplo, no es lo mismo analizar una obra de Bach, de Chopin, de Debussy o de Schönberg. Cada autor tiene cualidades que pueden ser contradictorias entre los distintos compositores o no tener nada que ver unas con otras.

A diferencia de Temperley y Sleator, y al igual que nuestro trabajo, Taube necesita tener para su sistema una notación musical correcta, por lo que él trabaja con un formato llamado *.satb*. No obstante, señala que permite la importación desde el formato MIDI (.mid) sin embargo, las notas de la partitura obtenidas en la importación tendrán probablemente que ser corregidas antes del análisis. Para ello, David Meredith desarrolló un algoritmo llamado “ps13 pitch spelling algorithm” (Meredith, 2006b) que resuelve “las faltas ortográficas musicales” de los formatos MIDI. Indica que tiene un acierto del 99,3 % sobre el clave bien temperado de J. S. Bach y otras obras barrocas y clásicas.

#### Taube realiza su análisis en cuatro pasos

**Primer paso** El primer paso del análisis se denomina análisis de “*sonoridad*”. Antes de explicar este paso debemos de destacar que para Taube una “*sonoridad*” es un conjunto simultáneo de notas, es decir un acorde. La “*sonoridad*” (el acorde) estará formado por un conjunto de tonos clasificados en tonos viejos “old tones” o tonos nuevos “new tones”. Se deduce por su explicación que los tonos viejos son las notas que componen un acorde, lo que nosotros denominamos notas reales del acorde, y los tonos nuevos son las notas extrañas del acorde (notas que no forman parte del acorde).

A cada “*sonoridad*” de la partitura que es analizada se le atribuye una posición métrica y una importancia. El conjunto de la duración y la importancia relativa de una “*sonoridad*” es expresado en términos de ticks (pulso) o en fracciones de tiempo.

Se identifica el valor rítmico más pequeño de todas las voces en la partitura y se asigna este valor como el incremento mínimo a analizar por una “*sonoridad*”. Este mismo procedimiento se realiza en el presente trabajo, con la salvedad de que el entorno que utilizamos está determinado por el compás, mientras que Taube lo determina en toda la obra. Nuestro entorno implica que el análisis es mucho más fluido que el suyo. Por ejemplo, si en un compás (cuaternario y con subdivisión a negra) el valor rítmico mínimo es de redonda y en el compás siguiente es de corchea (véase Figura 1.2), nuestro sistema analiza un solo acorde en el primer compás y ocho en el segundo. El sistema de Taube analiza ocho acordes en el primer compás y ocho en el segundo compás.

Taube distingue varios niveles de importancia de una “*sonoridad*” según la métrica de dicha sonoridad.

Una vez determinadas las “*sonoridades*” según los valores métricos las clasifica determinando el tipo de “*sonoridad*”, el estado e identifica si la “*sonoridad*” es de triada o cuatriada. Si una “*sonoridad*” no puede ser identificada se le asigna, en lo que él denomina, como tono no armónico (NHT), es decir nota extraña a la armonía. Si los tonos no armónicos son identificados como tal en el paso siguiente, los tonos restantes de las “*sonoridades*” vuelven a ser analizados para comprobar si forman algún acorde de triada o de cuatriada. Si la “*sonoridad*” todavía no puede ser identificada, Taube lo marca como una “*sonoridad*” no identificada.

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

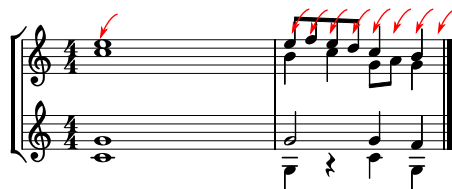
---



(a) Taube



(b) Transcripción análisis de Taube



(c) Nuestro sistema



(d) Transcripción análisis nuestro

Figura 1.2: Comparación del nivel mínimo de detección de la sonoridad entre Taube y nosotros

Para determinar el tipo de acorde que es, ordena todas las notas del acorde y lo compara con una tabla de modelos. Esta tabla integra todos los acordes posibles, las triadas mayores, menores, aumentadas y disminuidas, además de todas las séptimas (mayor, menor y disminuida) por encima de las triadas. También reconoce los acordes incompletos. Una vez reconocido la “*sonoridad*” se analiza el estado del acorde distinguiendo entre estado fundamental (cuando la fundamental de la “*sonoridad*” está en el bajo), primera inversión (cuando la tercera del acorde está en el bajo), segunda inversión (con la quinta del acorde en el bajo) y tercera inversión (con la séptima en el bajo).

Después de detectar las “*sonoridades*”, el sistema realiza un análisis al de denomina transición. La transición es la unión de distintas “*sonoridades*”. Con el modelo de

transición analiza movimientos de fundamentales, saltos melódicos y movimientos armónico-contrapuntísticos como movimientos paralelos, oblicuos y contrarios.

**Segundo paso** El segundo paso trata de analizar las notas extrañas a la armonía denominándolo el tono no armónico.

Después de realizar el paso uno, las “*sonoridades*” que no son reconocidas como tales pasan a ser analizadas en el paso dos. Determina que un tono no armónico es un tono que aparece en una “*sonoridad*” vertical pero que no pertenece a dicha “*sonoridad*”. El tono no armónico puede estar relacionado melódicamente con algún tono de la “*sonoridad*”.

En este paso, lo primero que determina es qué tono no encaja en la “*sonoridad*”, una vez encontrado el tono lo clasifica según su carácter melódico. Los restantes tonos de la “*sonoridad*” vuelven a ser analizados con el paso uno para determinar el tipo de acorde.

Si el tono no armónico no puede ser identificado o si el acorde no se puede clasificar, la “*sonoridad*” entera es catalogada como no clasificada y no es analizada en los pasos sucesivos.

El proceso de identificación de los tonos no armónicos distingue entre “*sonoridades*” métricamente débiles y “*sonoridades*” métricamente fuertes.

Una vez que el tono no armónico es identificado, se clasifica mediante un análisis melódico, donde se analiza la preparación y la resolución interválica del tono. Este análisis es comparado con una tabla de donde obtendremos la clasificación del tono no armónico.

El análisis melódico distingue la nota de paso, la anticipación, la bordadura, la nota de paso incompleta, la escapada, la doble bordadura, la suspensión y el retardo. Se puede sobreentender que la apoyatura es deducible de la suspensión y del retardo, con lo que (aunque él no lo determine) también analiza la apoyatura.

Taube expone unas limitaciones en este paso como pueden ser las resoluciones ornamentadas en las cuales la nota no armónica no procede directamente al tono de resolución ya que están adornadas. Para solucionar esta limitación su sistema utiliza un proceso heurístico para encontrar estas resoluciones ornamentales paso a paso. Indica que otros tipos de ornamentaciones no son encontrados.

Para la nota pedal utiliza un proceso al que denomina consolidación. La consolidación significa que un nivel de análisis puede ser explicado o absorbido por otro nivel más general o superior. El proceso de consolidación puede utilizar varios factores como:

- Niveles de pulsos e importancia métrica.
- Tensión agógica.
- Fuerza de progresión.
- Localización de círculos cadenciales.

Con el proceso de consolidación puede agrupar varias “*sonoridades*” en unidades formales más grandes, también lo utiliza para identificar acordes no armónicos que son el resultado de notas de pedal y para explicar los acordes que son el resultado de la yuxtaposición de varias notas extrañas.



## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

---

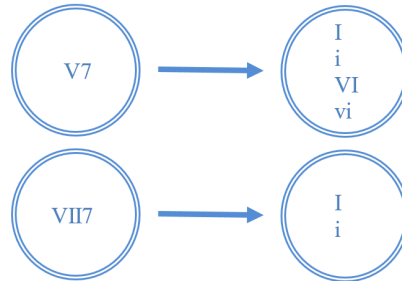


Figura 1.3: Relaciones acórdicas para la determinación de la tonalidad.

**Tercer paso** En el paso tres realiza un análisis tonal.

Con los acordes y las notas extrañas ya clasificadas se realiza el proceso de identificación de centros tonales en la obra y se construye una teoría funcional que explica el papel de cada “*sonoridad*”.

Al igual que se realiza en nuestro trabajo, la base de este proceso radica en la detección de las cadencias. Para identificar el tono de centro tonal (TCT), como Taube denomina, utiliza dos criterios independientes.

Por un lado, se busca una secuencia armónica en donde a un acorde mayor o menor (al que nosotros denominamos acorde-tónica) le precede la dominante mayor o un acorde disminuido. El acorde de dominante tiene que estar en relación de quinta ascendente o cuarta descendente con el acorde que se denomina acorde-tónica, mientras que el acorde disminuido debe de estar una segunda menor descendente del acorde-tónica.

Por otro lado busca los acordes de séptima de dominante y los disminuidos. El acorde de séptima de dominante implica que el tono de centro tonal está una quinta justa descendente de la fundamental del acorde y el acorde disminuido implica que el TCT está una segunda menor ascendente desde la fundamental del acorde.

Cabe destacar en este punto que en el modo menor la secuencia de acordes entre el segundo y el tercero grado implican una cadencia que Taube recoge como tono de centro tonal sobre la mediente. Para resolver este problema nosotros hemos utilizado un apartado denominado entorno.

Usando estos dos criterios el sistema busca secuencias que confirmen los centros tonales. El centro tonal se confirma con uno de los siguientes puntos:

- Al realizarse una cadencia perfecta o rota (los acordes representados por letras mayúsculas representan acordes mayores y las letras minúsculas acordes menores) (véase Fig. 1.3).
- Al realizarse un reposo cadencial
- Al realizarse una semicadencia a la dominante.

Con este sistema el proceso detecta TCTs que no son centros tonales. Estas identificaciones erróneas se solucionan en un proceso posterior denominado *retiro de centro*.

Una vez que los TCTs son identificados, el sistema crea un descriptor de centros tonales con esta información. Esta información incluye los centros tonales directamente representados por TCTs así como los centros teóricos (modular al tercero ascendente y descendente) y es controlada por un parámetro con tres opciones posibles: extraer todos los centros tonales posibles; sólo los centros tonales analizados en la partitura; o un grupo de centros tonales definidos por el usuario.

Una vez que determina el centro tonal analiza el modo de la tonalidad. Posteriormente transporta todo a un modelo de centro tonal y lo compara con una tabla. La tabla detalla los posibles acordes que pueden incluirse en el centro tonal.

El resultado es una serie de teorías tonales, en ocasiones simultáneas, que sostienen todas las interpretaciones posibles del grupo de “*sonoridades*” dados sobre los centros tonales.

**Teoría de máximos** En este paso, el sistema intenta describir la evolución probable de centros tonales en el transcurso de la composición. Esta descripción la denomina la línea de teoría de máximos. La teoría de máximos la obtiene de las líneas tonales individuales y la representa en su análisis paralelamente a los centros tonales. Para que se cree una línea de máximos y un centro tonal, todas las funciones tonales que la componen deben de ratificarse, si no la línea y el centro tonal son excluidas. Cuando en una composición existen dos o más centros tonales distintos y consecutivos, puede ocurrir una de las tres situaciones siguientes:

1. Las regiones de centro tonales se cruzan o se encuentran, definiendo una región compartida. Esta región estará formada como mínimo por un acorde, al cual se le denomina acorde pivote por pertenecer a los dos centros tonales. La elección del acorde pivote indica que se desarrollará en futuros trabajos debido a su complejidad.
2. Las regiones de centro tonales colindan, con lo que no se produce acorde pivote, por lo tanto la actividad armónica se explica dependiendo del centro tonal al que pertenecen. En este apartado se puede entender que Taube analiza las modulaciones por movimiento cromático y por movimiento enarmónico, aunque él no especifica tal factor.
3. Las regiones de centro tonales no colindan. Para este punto el sistema utiliza un modelo de modulación para resolver algunas situaciones bastante comunes. Este modelo de modulación está formado por unos acordes que pueden indicar un cambio de centros tonales. El sistema analiza los acordes que forman la región inexplicada según el modelo de modulaciones y si encuentra una explicación para dichos acordes, los extremos izquierdos y derechos de la región inexplicada vuelven a ser analizados, si no las “*sonoridades*” en el hueco son marcadas como indeterminadas en el análisis tonal. El modelo de centro tonal y el modelo de modulación explican todas las “*sonoridades*” en los corales de Bach que se han evaluado, pero no siempre de una manera óptima y los modelos todavía permanecen en desarrollo.

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

---

**Cuarto paso** En el cuarto paso expone un análisis de excepciones.

Una vez que se han realizado los tres primeros pasos, todas las “*sonoridades*” han sido analizadas, clasificándolas en el tipo de acorde, la inversión, la función tonal y los movimientos melódicos. El último paso realiza un análisis para identificar anomalías estilísticas y errores. Cada excepción la selecciona con un color, clasificándolas en cuatro niveles de severidad.

- El nivel más bajo implica una excepción y es ignorada en el análisis de la partitura (no es coloreada).
- El segundo nivel lo enmarca en color verde e implica una información u observación (por ejemplo: salto melódico disminuido, intervalo melódico aumentado, cruce de voces, cruce de voces oblicuo).
- El tercer nivel es de color violeta e indica un estilo o advertencia de uso (ej. Octava directa, quinta directa, unísono por movimiento directo, más de una octava entre voces, rango de voz erróneo, acorde sin tercera, retroceso armónico (V-IV), duplicación de la sensible, la séptima del acorde sin resolver, sensible sin resolver en el soprano).
- El cuarto nivel indica un error en el estilo y es enmarcado en color rojo (ej. Octavas consecutivas, quintas consecutivas (paralelas), unísono por movimiento paralelo).

Como conclusión, cabe indicar que el trabajo de Taube es un estudio excelente y nos ha servido, en algunos conceptos, como base para este trabajo.

# 2

## Breve evolución histórica del análisis

### 2.1 Inicio hasta final del Barroco Musical (1750)

---

El análisis aparece como tal hacia 1750, aunque no se consolidó hasta avanzado el siglo XIX. No obstante, ya existía como herramienta escolar desde la Edad Media, considerada dentro de dos ramas:

- Los que estudiaban los Sistemas Modales.
- Los teóricos de la retórica musical.

Por ejemplo, ya en el siglo XI, según [Bent \(1988\)](#), teóricos como Wilhelm of Hirsau, Hermannus Contractus y Johannes Affighemensis citaban antífonas y discutían sobre su modalidad como ayuda para la interpretación, como más tarde harían Marchetto da Padova y Gaffurius. En el siglo XIII, en la Polifonía de Notre Dame, ya se aplicaban las ideas de la oratoria clásica, con una influencia directa en la música de finales del siglo XV. En ese mismo siglo, concretamente en 1416, mediante la “Institutio Oratoria” de Quintiliano, se redescubrió la retórica greco-romana como instrumento de discusión, que en 1537, con “Musica” de Listenius, se introdujo en la teoría musical desde un punto de vista actual.

Según [Artaza \(2001\)](#), el primero que habló de la forma como un intento de adoptar para la música las divisiones de una oración fue Dressler en 1563, en su tratado “Praecepta musiace poeticae” que comenzó a distinguir el “Exordium” (Introducción), el “medium” y el “finis”.

Sigue Artaza comentando que en 1588, Pontio trató ya sobre las normas que se utilizaban para componer motetes, misas, madrigales, salmos, etc. Y a él se le sumaron Cerone, Praetorius, Matheson entre otros.

Según [Bent \(1988\)](#), en 1606 Burmeister propuso una primera definición de análisis:

“El análisis de una composición es la resolución de esa composición dentro de un modo concreto y una especie particular de contrapunto.”

Y estableció (Burmeister) un primer plan de Análisis formal en el que las figuras musicales pudieran ser tratadas de forma análoga a la retórica, y dividió este análisis en 5 partes:

## CAPÍTULO 2. BREVE EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL ANÁLISIS

---

1. Determinación del modo.
2. Especies de tonalidad.
3. Contrapunto.
4. Consideración de calidad.
5. Resolución de composición dentro de sus afecciones o periodos.

Lippius (1612), trató a la retórica como la base de la estructura de una composición y, como quiera que durante todo el Renacimiento y Barroco los principios de retórica fueron prescritos, más que técnicas de análisis lo que se proporcionaba eran técnicas rutinarias para el proceso de composición. Sin embargo tuvieron un papel muy importante en el conocimiento y la estructura formal durante esa época, y en particular, de la función de contraste y los enlaces entre las secciones contrastantes. Por ejemplo, Mattheson en 1739, enumeró seis partes de una composición bien desarrollada parecida a un aria:

- *Exordium*: introducción y principio de una melodía, en la que debe ser mostrada su total intención, tanto que el oyente esté dispuesto para todo y estimule su atención
- *Narratio* es un relato o narración en el que se sugieren el sentido y naturaleza del discurso. Es proporcionado en seguida cuando entra la voz o en la parte [instrumental concertada más importante, ya contada en el Exordium... por medio de una asociación apropiada [con la idea musical establecida en el Exordium].
- *Propositio* en pocas palabras contiene el significado y propósito del lenguaje musical y es simple o compuesto. Propositiones parecidas tienen su lugar inmediatamente después de la primera frase de la melodía, cuando en realidad el bajo toma el papel principal y presenta el material tanto breve como simple. Entonces la voz empieza su *propositio variata*, acoplada con el bajo, y de este modo se produce una proposición compuesta.
- *Confirmatio* es la consolidación artística de la proposición y por lo general se establece en las melodías mediante repeticiones imaginativas e inesperadas, no está incluida aquí la repetición normal.
- *Confutatio* es la resolución de dificultades (saber: ideas musicales comparadas u opuestas). En la melodía puede ser expresado mediante notas cualesquiera relacionadas, o mediante la introducción y rechazo de pasajes que aportan algo nuevo.
- *Peroratio*, por último, es el fin o conclusión de nuestra oración musical, y sobre todo debe ser especialmente expresivo. Y esto no se ofrece precisamente en el resultado o continuación de la melodía misma, sino especialmente en el *postludio*, sea para la línea del bajo o para un acompañamiento de cuerda; tanto se haya oído o no el *ritornello* anteriormente. Es costumbre que el aria concluya con el mismo material con el que se comenzó; tanto que nuestro *Exordium* también sirve como *Peroratio*.

---

## 2.1. INICIO HASTA FINAL DEL BARROCO MUSICAL (1750)

---

Conviene aquí hacer hincapié en tres aspectos tradicionales de la teoría musical que son la célula del desarrollo tanto crítico como interpretativo de la música posterior:

- Arte de la Ornamentación: desde Ganassi en 1535 hasta Virgiliano en 1600, existió gran preocupación con la enseñanza galante de la interpretación. Ésta se realizaba mediante cuadros de ornamentación que se ampliaban con ejemplos y reglas, estableciéndose entonces un primer concepto que después tomaría [Schenker \(1906\)](#): la disminución, que tiene dos formas de verse:
  - Como una subdivisión de notas largas en muchos valores breves. Como una superposición de un plano de material melódico menos importante a una línea melódica principal.
  - Como una superposición de un plano de material melódico menos importante a una línea melódica principal.
- Se crea de esta forma una jerarquía, que trasciende del puro virtuosismo para influenciar en el futuro. Aunque, en realidad este concepto de crear una estructura básica y luego elaborarla, se remonta al siglo IX y se desarrolla por diversos teóricos del siglo XIV como *Contrapunctus-diminutus*, y que luego influenció al llamado *Stile antico* llegando a Fux y, como se ha dicho, a Schenker.
- Bajo cifrado: estaba orientado al intérprete, tratándose al acorde como una unidad indivisible. Se crea así un concepto nuevo de disonancia y consonancia, que se asume rápidamente y otro concepto que resultará importantísimo para el futuro, el de Fundamental, en la línea del bajo escrito.
- Teoría de la armonía: [Rameau \(1722a\)](#) conceptualizó los principios de tonalidad que estaban cambiando la música a principios del siglo XVIII, empezando a prevalecer el concepto de armonía sobre el de melodía. Basa su idea sobre tres consonancias básicas: 8<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> y 3<sup>a</sup>. Partió, como [Zarlino \(1558\)](#), de la subdivisión de longitud de una cuerda. Vio la octava como la réplica de su original, y de ahí dedujo el principio de inversión como el resultado de una transposición del orden natural de los sonidos en una armonía. Además se establecieron diversas teorías armónicas vinculadas a las distintas gamas de afinación que se descubrían o se desarrollaban. Por ejemplo, el mencionado Zarlino, además de postular la implicación acórdica y concepto de inversión del acorde, desarrolló la gama de Tyndall (también denominada gama de los físicos, a su vez basada en Aristógenes y Tholomeo). Por otro lado, la teoría de la armonía se desarrolla notablemente con el descubrimiento de la gama temperada, la cual fue avalada fundamentalmente por J. S. Bach, creando dos grandes tratados llamados “El clave bien temperado”.
- Crea también otro concepto, el de Implicación, refiriéndose al hecho de que los sonidos puedan ser oídos en un acorde aunque no estén. Compilando los tres conceptos, Inversión, Implicación y Duplicación, nos surge otro, el de Fundamental, entendida como serie de notas dispuestas en un bajo al que llama Bajo Fundamental y que origina una progresión armónica en el sentido que actualmente le damos.

## CAPÍTULO 2. BREVE EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL ANÁLISIS

---

[Rameau \(1722a\)](#) realiza varias grandes aportaciones al análisis musical, entre las que destacan:

1. Aclaraciones para las estructuras de acordes consonantes y disonantes.
2. Perspectiva concentrada de la tonalidad.
3. Acercamiento abreviado a la estructura musical.
4. Primacía acústica a la tríada mayor ofreciendo así la posibilidad de verificación científica a los sistemas analíticos.

Hay otros tres teóricos barrocos dignos de reseñarse:

- Johann David Heinichen (1683-1729) contactó la teoría del bajo cifrado con la teoría de la composición, creando el concepto de “Notas Fundamentales” (notas principales de líneas melódicas después de eliminarse las no esenciales).
- Johann Philipp Kirnberger (1721-1783) realiza una teoría de la construcción melódica y es el primero en realizar un análisis de una obra suya.
- Johann Abraham Peter Schulz (1747-1800), que postula: “Todo lo que no pueda reducirse a una progresión natural de los dos acordes fundamentales no es correcto”.<sup>1</sup>

Se puede reseñar que [Schenker \(1906\)](#) tiene el mismo principio que Schulz, ya que intenta reducir toda una obra a una progresión natural, incluso a un acorde.

### 2.2 Del Clasicismo al primer Romanticismo (1750-1840)

---

Aunque para muchos tratadistas, el Clasicismo comienza alrededor de 1730, nosotros lo incluimos en 1750 debido a que es el año en que muere Bach. Como premisa debemos de indicar que ya en este año (1750) el sistema temperado está totalmente establecido y ha derogado a todas las demás gamas de afinación. Este sistema es el que se mantiene hoy en día.

Según [Bent \(1988\)](#), los orígenes del análisis musical se hallan a mitad del siglo XVIII. Esta disciplina se encuentra profundamente vinculada al origen de la estética, que surgió entre filósofos ingleses al contemplar la belleza desde un punto de vista no egoísta, en una actitud catalogada por Lord Shaftesbury (1671-1713) como de atención desinteresada, que podíamos decir que consistía en un modo de interés que no iba más allá del objeto contemplado.

De esta percepción, definida por Leibniz como una actividad intrínseca más que como una elaboración de impresiones sensitivas, surgió el término Estética en el siglo XVIII acuñado por vez primera por Alexander Baumgarten (1714-1762) (libro reeditado

---

<sup>1</sup>según [Bent \(1988\)](#), página 15. Traducción por J. Martínez Oña (libro en trámites de edición).

## 2.2. DEL CLASICISMO AL PRIMER ROMANTICISMO (1750-1840)

---

en 1977, Baumgarten (1977)), y fue esta visión de que lo bello no existe en la materia pero sí en el arte, la que atrajo la atención de la forma externa como contemplación. Fue Kirnberger (1781) quien estableció un esquema fijo de acordes para danzas y proporcionó motivos que serían elegidos al azar.

Koch (1782) aplicó la teoría de la atención desinteresada a la música creando la teoría sobre la estructura melódica de la frase en base a la ampliación y comprensión (en términos de reducción) en busca de la simetría, proporcionando el plan de las piezas de la suite, y en donde separaba modelo de individualidad (esto fue muy importante pues condujo a la teoría de Riemann). Koch discute sobre el ritmo y el metro, y establece una organización jerárquica en la que dos compases “segmentos” o “incisos” se reúnen en parejas formando “frases” de cuatro compases que se agrupan alternándose para formar “periodos”. Estableció reglas que proponían cómo podía ser modificada esta organización sin que se perdiera equilibrio mediante tres procedimientos:

1. Repetición total o parcial de una frases, dando a entender la idea de función dentro de una frase más que la de material melódico, hablando muchas veces de “repetición de un compás” cuando el contenido de aquel compás es diferente en la segunda exposición.
2. Multiplicación de frases y diferentes figuras cadenciales.
3. Recurso de ampliación, mediante el que se puede encajar una frase unitaria de dos o cuatro compases dentro de una melodía existente. Por ejemplo, cuando una frase contiene unidades de un compás de las cuales la primera se repite, entonces la segunda debe ser también repetida, porque si no la manipulación desigual de estas pequeñas unidades sobresale como un efecto desagradable. Este principio de ampliación tuvo su precursor en Joseph Riepel (1709-1782) y en Kirnberger que discutía acerca de la construcción de frases de 8 compases en dos unidades de cuatro, y designaba a cada acorde con su tipo de cadencia.

Conviene hacer constar que Koch utilizó signos que se encuentran en Riepel, tales como el cuadrado, cruces y letras para designar recursos estructurales. Utilizaba el término “figura melódica” como unidades de construcción formal, y las indicaba con corchetes y números.

Según Bent (1988), Kirnberger, alumno y difusor de J. S. Bach, estuvo influenciado por Riepel y por Johann Georg Sulzer (1720-1779) quien había elaborado la llamada Teoría de los Planos en la que creaba una serie de conceptos escalonados cuya aparición por dos veces originaba el siguiente. En esta serie, el llamado “Segmento incompleto” era el más pequeño, y a él le seguía el “Segmento completo” etc, quedando así la escala:

Segmento Incompleto - Completo - Frase - Periodo.

El ya mencionado Koch, también es relevante por la creación del llamado modelo formal, basado en la idea de un modelo tal pone de manifiesto un plan para una obra y las características más sobresalientes. El artista, siguiendo este modelo, puede entonces



## CAPÍTULO 2. BREVE EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL ANÁLISIS

---

proceder a la ejecución o terminación del diseño y finalmente a la elaboración de la obra en todos sus detalles. Proporciona el modelo de formas pequeñas como *gavota*, *bourréé*, polonesa, *anglaise*, minueto, marcha, coral y melodía figurada. Todos estos modelos eran generadores, y a partir de ellos se podrían crear composiciones casi mecánicamente.

Este modelo lo usarían, según Bent (1988) Prout, Riemann y Leichtentritt.

Reicha (1824) dio otros términos a esta progresión y la llamó, de pequeña a mayor:

Diseño - Ritmo - Periodo - Sección.

En ella, el diseño se puntúa con 1/4 de cadencia; el ritmo, con una semicadencia; el periodo con 3/4 de cadencia o cadencia perfecta, etc. Y así se justificaba la simetría, que se basaba en 4 puntos:

- Cada división es de dos compases.
- Tras cada división hay un reposo separador.
- Todas las divisiones son iguales dentro del sistema.
- Los puntos de reposo o cadencia están situados a distancias iguales.

Entre los tratados de Koch y Reicha hubo una obra de J. J. de Momigny (1762-1842) “Cours complet d’harmonie et de composition” (de Momigny, 1806) que por primera vez, dedicó un amplísimo análisis de una obra. En concreto el primer movimiento del cuarteto de cuerda en Re menor K.421 de Mozart, con una extensión de 144 páginas, y analizando tanto la estructura de frase como el contenido expresivo. La estructura de frase se basaba en el Alzar que iba al Dar, y que siempre se hacía en ese orden en un sentido cadencial: el Alzar en sentido de antecedente y el Dar en sentido de consecuente, creando otra terminología escalonada:

Cadencia melódica - Cadencia armónica - Hemistiquio - Verso - Periodo

de Momigny (1806) crea una tonalidad ampliada de 27 sonidos formado por los 7 sonidos diatónicos, los 5 sostenidos cercanos, los 5 bemoles, y los 10 doble alterados, sentando así las bases para una visión de la música que llegó a ser importante a finales del siglo XIX: la llamada sucesión de lapsos de tensión (resulta curioso ver cómo para demostrar estos lapsos, se superponían textos verbales sobre el material musical construyendo un paralelismo poético). Para ello, presentaba el análisis de forma ordenada colocando 10 pentagramas paralelamente en donde los 4 de arriba mostraban la pieza a analizar, en el quinto se presentaba la línea melódica (iniciando la reducción melódica), en el sexto y séptimo se colocaba una reducción armónica con sus cadencias, el octavo y noveno presentaban el material melódico con el texto poético y el acompañamiento de piano, y el décimo mostraba las fundamentales de la armonía como un bajo fundamental.

En su análisis de la Sinfonía nº 103 “Drumroll” de Haydn, utiliza también el denominado “análisis poético y pictórico” que consistía en una narración poética paralela

## 2.2. DEL CLASICISMO AL PRIMER ROMANTICISMO (1750-1840)

---

a la música en la que se relataba un acontecimiento al modo romántico (en este caso una comunidad aldeana aterrorizada por una terrible tormenta) y que pertenece a una tradición del siglo XVIII de explorar la zona fronteriza entre texto y música.

Otro análisis importante de la época es el realizado por [Hoffman \(1971\)](#) de la Quinta sinfonía de Beethoven, con un lenguaje pictórico y una descripción técnica que no ve la música en formato fijo sino como una continuidad sin junturas impulsada por temas, en lo que, por otro lado, es una de las características del movimiento romántico.

[Logier \(1827\)](#), creador del “Chiroplast”, realizó un análisis del Adagio del Cuarteto en sol Op 76 n° 1 de Haydn examinado bajo ocho encabezamientos diferentes:

- Tonalidad
- Tiempo
- Bajos fundamentales
- Modulación y séptima fundamentales
- Disonancias
- Notas de paso, notas auxiliares y armonía secundaria
- Periodos
- Secciones
- Imitación

También edificó una teoría sobre cómo construir melodías, en las que se procede en cuatro etapas:

1. En primer lugar, se pone debajo una línea de bajo abstracta de tres notas (do-sol-do) con las que se construye un periodo y que lo divide en dos medios periodos.
2. Se construye un bajo fundamental sobre ellas.
3. Se superpone por encima el bajo invertido (bajo escrito).
4. Se construye una superestructura de melodías y voces intermedias.

[Czerny \(1849\)](#), tomando el mismo modelo, despoja la superficie de figuración (“la figura móvil”) dejando sólo las armonías subyacentes (“la armonía básica”) presentada en bloques de acordes. Cabría decir que de este modelo, el propio Schenker posteriormente, extrajo interesantes consecuencias prácticas para sus teorías.

También en esa época, J. B. H. Birnbach (1793-1879), fue el primero en utilizar la expresión “segundo tema”.

Paralelamente, Gottfried Weber (1779-1839) en [Weber \(1817\)](#) expone un nuevo método para designar tipos de acorde mediante signos, y empieza a incluir letras barrocas

## CAPÍTULO 2. BREVE EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL ANÁLISIS

---

grandes y pequeñas y círculos y barrados, con el fin de cifrar los acordes. También coloca números romanos, grandes y pequeños para indicar los grados.

Como curiosidad, podemos indicar que durante su vida fue plagiado por sus contemporáneos, y que en vano reclamaba la paternidad del sistema que luego fue profusamente utilizado en el siglo XX.

El cuadro de las armonías fundamentales de cada tono mayor de Weber es:

I	y	I7
ii	y	ii7
iii	y	iii7
IV	y	IV7
V	y	V7
vi	y	vi7
°vii	y	°vii7

El cuadro de las armonías fundamentales de cada tono menor es:

		i
°ii	y	°ii7
iv	y	iv7
V	y	V7
VI	y	VI7
°vii	y	°vii7

[Lobe \(1850\)](#), treinta años después usaba un sistema similar de designación más bien tosco, en el que la discusión sobre la armonía se centraba en el concepto de grado armónico. Para ello, distinguía entre las progresiones diatónicas y modulantes; y admitía el concepto de acordes alterados con notas extrañas que a veces eran consideradas diatónicas para aumentar el poder del grado armónico.

[Sechter \(1853\)](#) en su tratado de composición, define el bajo fundamental de [Rameau \(1722b\)](#) como una sucesión de fundamentales y armonías subyacentes proyectadas por ellas. Llamó grado a las notas y las definió como extrañas y propias. Fue el primero en definir la armonía cromática como diatonismo inflexionado, y llamó a las dominantes secundarias como acordes híbridos. Influyó notablemente a Schoenberg, y también habló de esquemas rítmicos e hizo uso de notables recursos gráficos.

### 2.3 La continuación del Romanticismo. De 1840 a 1900

---

La posición que mantiene [Czerny \(1849\)](#) frente a la forma estaba muy concretada, ya que afirmaba que la composición debía pertenecer a una especie ya existente; por lo que no debía permitirse ninguna originalidad. Lo que Czerny entiende por forma y construcción, es en sí mismo, muy específico definiéndola de 6 maneras:

### 2.3. LA CONTINUACIÓN DEL ROMANTICISMO. DE 1840 A 1900

---

1. Según la extensión.
2. Según las modulaciones.
3. Según el ritmo. Manteniendo la proporción y la simetría tanto en las células como en las secciones de la obra.
4. El modo de introducir las melodías y la alternancia con figuraciones móviles o puentes.
5. Por el manejo de la idea principal.
6. Por la estructura de los diversos componentes.

[Marx \(1837\)](#) creía en la originalidad del artista y en el genio como don especial que transgrede las reglas, por eso manifiesta, al contrario de Czerny, de un número ilimitado de formas, definiéndola como la manera en que el contenido de una obra se configura. Para él las formas son modelos abstractos de prácticas anteriores; modelos arraigados de organización descubiertos a través del análisis. Por eso el estudiante no puede aprender composición sólo mediante inspiración e ideas, sino que necesita modelos de compositores anteriores como etapa intermedia en el camino hacia la composición libre. Si bien acepta la semejanza de forma entre piezas distintas, niega firmemente que las formas fueran rutinas, por lo que niega la forma como una convención y proponía una base epistemológica.

Influenciado por H. Pestalozzi (1746-1827), que veía la ley del desarrollo natural como un proceso interno en donde se comienza, se germina y se crece, [Marx \(1837\)](#) emplaza el concepto de Motivo, definiéndolo como una diminuta unidad de dos o más notas que sirven como la semilla o brote de la frase, por lo tanto bajo la obra de arte moldeada conscientemente debe encontrarse un trabajo de la naturaleza moldeado inconscientemente. Es decir, podemos deducir que, para Marx, en un buen compositor conviven simbióticamente la inspiración con el estudio del análisis.

Marx publicó sus estudios con análisis de las sonatas de Beethoven, pero fue Berlioz, con unos artículos sobre las sinfonías de Beethoven el primero en realizar el estudio de un género completo de la obra de un compositor.

Al principio del siglo XIX surgió el músico aficionado que escribía para los aficionados a la música. De entre los alemanes destaca Ernst Von Elterlein, con estudios sobre las sinfonías de Beethoven, que él mismo calificó como aclaraciones en lugar de analítico. Aunque el más importante de todos fue el ruso Wilhelm von Lenz (1852) con un interesante estudio del desarrollo del estilo musical de Beethoven, mediante el uso de la metáfora.

Según [Bent \(1988\)](#), Moritz Hauptmann (1792-1868) formuló en 1853 una teoría de armonía y ritmo basada en lo que llamó ser universal, en el que tomaba un modelo de dos elementos llamado tesis, que si era de tres elementos se le llamaba antítesis, y si era de cuatro se le llamaba síntesis, en donde la unidad era un Dar seguida de un Alzar. Además introdujo la idea de que la teoría musical sería sistemática y basada en principios lógicos.

## CAPÍTULO 2. BREVE EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL ANÁLISIS

---

Fue Mathis Lussy quien en 1903 en su estudio de la anacrusa desarrollaba la Teoría de Momigny (basada al igual que Hauptmann en que la célula está establecida en dos elementos (tesis) o más, pero se diferencia en la secuencia del golpe: para Momigny la secuencia era Alzar y Dar) y desde ésta, [Riemann \(1929\)](#) desarrolló su celebrada Teoría del Motivo, que consistía en la idea de una unidad sencilla de energía que va pasando por diversas fases de crecimiento, cumbre y decaimiento. La forma musical se compone de muchas unidades que se van solapando y mezclándose mutuamente para producir, expandidas y comprimidas, vanos de energía.

En 1850, Lobe rechaza el adiestramiento basado en el contrapunto y la fuga para los alumnos de composición por considerar que sería inevitable que siempre surgirían en las obras futuras de todos los compositores instruidos en ellas, reduciendo la textura a su materia esencial y disponiendo guías para su reducción.

Es a partir de 1852, según [Bent \(1988\)](#), con la presentación del trabajo de E. F. E. Richter sobre forma musical y análisis, cuando se van a suceder una serie de publicaciones. En 1854 Sechter publicó su tratado de composición. En 1885 Salomon Jadassohn publicó un estudio sobre la forma en la Historia de la Música. En 1887 A. J. Goodrich publicó una guía completa del análisis musical y Percy Goetschius (1853-1943) publicó una colección de libros de forma musical. En 1897 Ebenezer Proust (1835-1909) escribió sobre la forma musical llegando hasta la forma cíclica del poema sinfónico. Por último Hugo Leichtentritt (1874-1951), publicó en 1911 un estudio sobre ideas estéticas y la base del estilo de la forma y la lógica y coherencia en música.

### 2.4 Conciencia histórica durante el Romanticismo

---

El crecimiento de la conciencia histórica en el siglo XIX, que a la vez contribuyó al desarrollo del análisis, se fundamenta en dos aspectos.

**Deseo de introducirse en el pasado para descubrir su esencia.** Este espíritu, en confluencia con la imagen romántica del “genio” dio lugar a un nuevo tipo de estudios. El primero de ellos fue el de Baini sobre Palestrina en 1828; el de Winterfeld sobre Gabrielli en 1834; el de Ulibishev sobre Mozart en 1843 y el de Spitta sobre J. S. Bach en 1873.

Aún antes, en 1802, Forkel hizo un análisis de estilo del mismo J. S. Bach. Basándose en la totalidad de su obra antes que en composiciones individuales, recalcó la influencia de dos factores en su manera de componer: el genio y una incansable aplicación. Para identificar al genio tomó cinco aspectos musicales: armonía, modulación, melodía, ritmo y contrapunto. Su método servía para citar un contexto técnico, exponer lo convencional en los términos teóricos o prácticos de su época y luego considerar el manejo hecho por Bach de los mismos. De este modo, hizo aclaraciones con respecto a la obra de Bach para explicar el uso de las notas de paso, de puntos de pedal, de modulaciones lejanas, etc, justificando las aparentes “transgresiones normativas” como productoras de efectos suaves y naturales.

## 2.4. CONCIENCIA HISTÓRICA DURANTE EL ROMANTICISMO

---

El estudio sobre Mozart realizado por Otto Jahn (1813-1869), está basado en la teoría contemporánea de composición y en escritos críticos, en los que compara a varias obras de un mismo periodo.

J. A. P. Spitta (1841-1894), en su estudio de Bach da la misma importancia a obras individuales que a las obras a gran escala, con búsqueda de intenciones simbólicas.

**Desarrollo del texto crítico musical, lo que conllevó la primera de las masivas ediciones completas.** El más influyente fue [Nottebohm \(1865\)](#), que trabajó en las ediciones completas de Beethoven y Mozart, abordando el proceso creativo de Beethoven, describiendo cómo trabajaba en varias obras a un tiempo, cómo borraba, usaba bocetos, etc.

Estos bocetos provocaron muchos estudios, como el de [Lobe \(1850\)](#), que fundamentó el proceso compositivo en base a cuatro etapas, basadas en la mecánica de la continuidad de la melodía:

- Primer boceto: invención de ideas
- Segundo boceto: expansión de ideas.
- Boceto acabado completo
- Partitura definitiva.

George Grove (1896) aprovechó los descubrimientos de Nottebohm, analizando las Nueve Sinfonías de Beethoven ofreciendo una imagen completa de sus sujetos, y con información histórica, biográfica, textos críticos y análisis formal, llegando a crear un sistema de adjetivos que hoy ya es tópico. No utiliza la idea del crecimiento del motivo, y crea semejanzas entre distintos compositores en los llamados “Kindred Themes” (temas semejantes). Evitó las descripciones naturalistas prefiriendo utilizar metáforas para describir circunstancias de la obra (ya que era un historiador), por ejemplo “el destino llamando a la puerta” es una atribución suya.

Robert Schumann (1810-1856), influyente compositor, realizó un estudio de la “Sinfonía fantástica” de Berlioz, abordando su sujeto desde cuatro puntos de vista:

- Construcción formal.
- Estilo y textura.
- Idea poética que recorre la obra.
- Espíritu de la obra. Examinando su estructura sección a sección y deduciendo su simetría.

Hermann Kretzschmar (1890), elaboró una guía que abarca casi 300 años, desde Monteverdi hasta Mahler.

En la guía hizo tres clasificaciones:

## CAPÍTULO 2. BREVE EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL ANÁLISIS

---

- Sinfonía y suite.
- Música sacra.
- Oratorios y música coral no religiosa.

### 2.5 Principios del siglo XX. La Reducción y el Individualismo

---

Ya Marx, considera la forma como la totalidad, y como un principio inconsciente de organización de la mente humana. Con Proust y Leichtentritt apareció una nueva rama de psicología que ponía más énfasis en la percepción que en la motivación, la llamada Psicología de la forma (Gestalt). Se fundamentaba en que los objetos cercanos tienden a ser percibidos en grupos, por lo que la mente busca lo sencillo disponiendo en grupo, y luego su repetición y simetría. Es decir, la mente intenta reconocer lo sencillo, lo más normal.

El sonido musical fue utilizado para ejemplificar este tipo de psicología por parte del primer psicólogo de la Gestalt. Fue Christian von Ehrenfels, quien indicó que una melodía no pierde su identidad al ser transportada, pese al cambio de sus notas, debido a que tiene una configuración que puede ser percibida, reconocida y aprendida sin el reconocimiento de sus notas, intervalos o ritmos constitutivos. Y esta percepción es como un cierre de un circuito eléctrico y viene determinado por cuatro principios:

- Clausura: principio por el que la mente tiende a completar una configuración cuando en la exposición no lo está.
- Fenómeno Phi: principio que permite a la mente enlazar, unir y atribuirles el movimiento del uno o del otro a dos acontecimientos independientes.
- Pregnancia: principio por el que la mente busca la interpretación que permita el mejor resultado.
- Percepción del fundamento: principio por el que la mente selecciona, mucho antes de tener los datos, sólo ciertas características sobresalientes. Es el llamado “Proceso de Reducción” que utilizara Czerny (1849) al vaciar los ornamentos y dejar sólo el esqueleto o “estructura subyacente” que llamará [Schenker \(1906\)](#).

Todo esto se puede ver en una transcripción para laúd de una pieza vocal del siglo XVI o en solos de violín o violoncellos de Bach, debido a la limitación del instrumento en el primer caso o en el hecho de no estar completas las líneas contrapuntísticas en el segundo.

Arnold Schering (1877-1941) fue el primero en utilizar a gran escala estos procedimientos en un análisis de un madrigal italiano del siglo XIV, introduciendo la idea de desadornar, que consistía en quitar notas de pequeño valor y sustituirlas por otras de más valor. Y llamó a lo que descubrió núcleo melódico o células, y dedujo que los madrigales del siglo XIV eran adaptaciones para teclado de aires populares, por tener la progresión

## 2.5. PRINCIPIOS DEL SIGLO XX. LA REDUCCIÓN Y EL INDIVIDUALISMO

---

melódica fundamental. Esto proporcionó las bases del evolucionismo melódico de Reti, Keller y Walker y de la armonía estructural de Schenker (1906).

En 1906, Schenker publicó su Tratado de armonía (Schenker, 1906), que tenía dos conceptos básicos para el futuro: el despliegue compositivo y la prolongación. Argumentaba que los acordes no estaban siempre en grados esenciales sino que solamente eran su prolongación. De ahí dedujo la diferencia entre acorde y grado y otra serie de planteamientos que se explican luego en la exposición de su análisis. También tomó a Carl Philip Emanuel Bach como modelo en su concepto de disminución con el que estaba estrechamente ligado.

Guido Adler (1855-1941), intentó cambiar la naturaleza del escrito histórico musical introduciendo el concepto de estilo como lo más importante para el historiador. Explica una serie de criterios para examinar la estructura de una obra bajo títulos generales como:

- Características rítmicas
- Tonalidad
- Construcción polifónica
- Colocación de palabras
- Tratamiento de los instrumentos
- Práctica interpretativa

Criticaba a sus contemporáneos por la historización que hacían de un grupo de compositores en vez de determinar terminologías adecuadas, y por el culto al héroe, en vez de edificar un estilo realizado por compositores grandes y pequeños.

La historia de la música era como una auto-tejeduría cuyos hilos eran las características de estilo, que vienen dirigidas por lo que él llamaba dirección de estilo, hibridación de estilo, cambio de estilo o mixtura de estilo. Ponía, en consecuencia, énfasis en la “comprensión” de los hechos tal como suceden y para ello crea dos métodos:

- Método inductivo: que toma algunas piezas y las examina para identificar lo que tienen en común y en lo que difieren.
- Método deductivo: que compara una obra dada con otras circundantes, midiéndola contra ellas con criterios de grupo tales como el uso del motivo y del tema, el ritmo, la melodía, la armonía, la notación, si es sacra o profana, vocal o instrumental, lírica o dramática, etc.

Adler hizo un estudio del estilo clásico vienés, y le siguieron, Wilhem Fischer, Ernst Bücken (1884-1949) y Paul Mies (1889-1976), y como consecuencia se detectó una especial atención en Beethoven sobre el que se hicieron muchos estudios como el de Hans Gal y Ludwig Schierdermair sobre el joven Beethoven, en 1916 y 1925 respectivamente;



## CAPÍTULO 2. BREVE EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL ANÁLISIS

---

el de Gustav Becking sobre el estilo personal en 1921; el de Mies sobre sus bocetos en 1925; el de August Halm sobre su periodo central en 1926; el de Walter Engelsmann sobre sus niveles de composición en 1931, etc.

Gustav Becking (1918) estaba interesado en el ritmo como determinante de individualidad y elaboró una serie de mecanismos gráficos conocidos como Curvas de Becking, para reconocer las constantes nacionales y las constantes personales rítmicas.

El más influyente análisis de estilo fue el que hizo Jeppesen (1923) sobre Palestrina y la disonancia en 1923. En él amplió el método de Adler comprendiendo la necesidad del enfoque histórico del tratamiento de la disonancia. Al estudiar a Palestrina, comenzaba con un punto central y firme desde el que podía mirar hacia atrás y hacia adelante, creando el método empírico-descriptivo, que consistía en la comparación de variantes que fijan cualidades comunes, que sirven como base para desarrollar las leyes del lenguaje de la evolución musical.

Primero analizaba el estilo melódico, lo que le permitió deducir el uso de las sextas mayores y menores como intervalos muertos y la prohibición no escrita del salto ascendente desde una negra acentuada. Esta es la razón por la que se considera al método como científico, porque el analista no selecciona ni resume: presenta todos los datos para cada caso y ofrece objetivamente leyes de ellos.

### 2.6 1920-1945. Teoría de tensiones y niveles estructurales

---

Según Bent (1988), Ernst Kurth (1886-1946), seguidor de la Gestalt, también usaba el concepto del Albedrío de Schopenhauer, y el del subconsciente mental de Freud. Veía tres leyes de movimiento en la creación musical, que estaban en relación con los tres niveles de percepción aural de los psicólogos de la forma (percepción auditiva, organización sensorial en el sistema nervioso y comprensión a nivel psicológico):

- Operación del “albedrío” en forma de energía cinética
- Nivel psicológico: emociones del inconsciente arrastran a producir un juego de tensiones donde cada tirón de tensión describe un arco de crecimiento y formación.
- Manifestación acústica: que es donde se manifiestan las tensiones anteriores.

Como los tres niveles se activan uno detrás del otro, la línea resultante tiene carácter de unidad y forma una progresión cerrada, y es lo que se llama concepto de lo lineal, que se descubre sobre todo en la música de Bach y en el contrapunto, cuyo resultado armónico es secundario.

Las notas que forman una melodía contienen “energía cinética”; las notas que forman un acorde contienen “energía potencial”. La armonía tonal es un sistema de coherencia interna que acarrea la posibilidad de cambio, producida por la energía potencial. La tensión más terrible es la de la nota sensible, considerando a la alteración cromática como un proceso de colocación de sensibles donde normalmente no debería producirse y distinguió dos fuerzas en movimiento en la armonía romántica, creando una polarización:

## 2.6. 1920-1945. TEORÍA DE TENSIONES Y NIVELES ESTRUCTURALES

---

- Fuerzas constructivas: de cohesión de la tonalidad.
- Fuerzas destructivas: son las que disuelven el cromatismo, como el uso de las alteraciones, el uso de los acordes de séptima y novena, etc. en lugar de tríadas, y el uso de acordes efectistas como el de “Tristán”.

El que mejor comprendió el problema de forma y tonalidad en Wagner fue Alfred Lorenz (1868-1939). Su obra, publicada en 1922 sobre Wagner fue un hito en la historia del análisis: una pieza a gran escala de escritura analítica ininterrumpida sólo comparable al análisis de [Schenker \(1906\)](#) de la Novena Sinfonía de Beethoven. Lorenz utiliza gráficos con curvas sinusoidales, para el movimiento armónico; la curva de proyectil para el contorno formal, la gráfica para el esquema moduladorio, etc.

La obra de Lorenz es el compendio de todos los desarrollos analíticos anteriores. Contiene ideas de la Gestalt; conceptos de periodicidad y simetría de [Riemann \(1929\)](#); determinaciones de estructura extraídas de la forma tradicional; percepción de los movimientos armónicos de Kurth, etc. Veía la construcción formal como creada en tres fundamentos primarios: armonía, melodía y ritmo. Separaba en periodos según el área tonal. Analizaba los leitmotifs en agrupaciones formales: formas de repetición, de arco, de estribillo, excepcionales, etc.

Su mayor aportación a la teoría de la música la hace en base a una jerarquía musical, cuyos extremos son el ritmo corto y el ritmo largo, que surge del otro mediante formas que están “elevadas a una potencia superior”. Tres pasajes consecutivos se pueden construir por este procedimiento formando un ABA; el tercero de ellos puede ser una reexposición del primero y producir así una forma de arco en un nivel superior. También describió la incrustación de unidades de pequeña escala dentro de las formas, ampliándolas y cambiando el equilibrio, y de formas de muy a gran escala, que contienen formas de pequeña escala de diferentes tipos.

Poco después, Schenker publica un libro de análisis sobre obras de Bach, Scarlatti, Mozart, Beethoven y Chopin y un nuevo tipo de análisis gráfico. Éste se escribía en la llamada tabla de melodía fundamental, que generalmente era la presentación de una pieza íntegra o reducida en parte, con el uso normal de los valores de nota y con una indicación completar el tiempo y el barrado original (numerado para servir de referencia). Ésta se anotaba con símbolos analíticos auxiliares tales como:

- Corchetes horizontales e inclinados sobre el pentagrama, que muestran el movimiento de la melodía fundamental.
- Encabezamientos escritos en grande para indicar la importancia estructural.
- Líneas curvas a modo de fraseo.
- Marcas inclinadas para indicar progresiones importantes.
- Curvas punteadas para indicar la retención estructural a largo plazo de un tono en particular a pesar de que participen varios tonos.

## CAPÍTULO 2. BREVE EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL ANÁLISIS

---

- Números romanos para indicar los grados armónicos fundamentales, con el bajo convencional representado para mostrar las armonías subyacentes.
- Pentagrama paralelo (en ocasiones) para mostrar las armonías esenciales con los valores de notas despreciados por cuanto una mayor duración implicaba una mayor importancia estructural.

Debemos decir aquí que la formulación más allá del componente rítmico del método analítico de Schenker habría de esperar 40 años. En 1977, Maury Yeston investiga el modo en el que los elementos rítmicos se interaccionan con elementos de altura sonora en la estructura musical. Y Carl Schachter, en 1980, investiga la reducción de la duración, explotando los efectos métricos a largo plazo producidos por los compases enteros. [Berry \(1966\)](#) y [Forte \(1995\)](#), han escrito también obras fundamentales sobre ritmo y métrica.

Paul Hindemith, en 1937, cree sentar las bases de una lengua franca para la composición moderna procedente del firme fundamento de las leyes de la naturaleza. En paralelo a Schenker, su teoría tiene su origen en la crisis de la música antes de la Primera Guerra Mundial, pero mientras Schenker miraba hacia atrás confirmando las leyes inmutables de la música alemana clásica, Hindemith afirmaba el avanzado movimiento de la música del siglo XX, buscando los principios racionales en ese movimiento, y de ahí el enfrentamiento existente entre ambos.

El sistema de Hindemith se basa en la acústica. Si se toma alguna de las notas de la octava cromática, las otras once pueden ser colocadas en orden de relación descendente. Esta serie se llama Serie 1. Adoptando el principio de inversión determina un orden para los intervalos basado en curvas de combinación tonal de creciente complejidad. Éste producía la Serie 2, de intervalos descendentes con respecto a una nota dada. Esta serie no reconoce el punto en que acaba la consonancia y empieza la disonancia. Desde ésta, Hindemith desarrolla un sistema de análisis de acordes, que primero asigna una fundamental para un acorde, siempre presente en el acorde pero distinta de la fundamental de Rameau, y por tanto mide la intensidad de ese acorde. Clasificó los acordes que contienen de tres a seis notas en grupos y subgrupos separados de acuerdo con su intensidad armónica. De esta forma se podían crear acordes en sucesión de acordes en crescendo y decrescendo armónico al libre antojo. Y llamó fluctuaciones armónicas a estos aumentos y disminuciones de intensidad, e ideó un medio gráfico de expresarlo bajo el pentagrama.

La diferencia básica que existe con Schenker es que no hay niveles estructurales. Todas las notas que hay en la superficie pueden servir para centro tonal, y la modulación es un procedimiento tonal aceptado que no disminuye su existencia.

[Schoenberg \(1989\)](#) veía que la forma había de ser comprendida en dos dimensiones:

- Subdivisión: que permite a la mente conocer la totalidad mediante unidades
- Lógica y coherencia: sin la que las unidades quedan inconexas.

Schoenberg consideraba la música como orgánica. La música empieza, pues, con un motivo que debe ser repetido y esa repetición implica variación. Esa variación puede ser

---

## 2.7. DISENTIMIENTO DEL EMPIRISMO

---

rítmica, interválica, armónica y melódica, subdividiendo cada una sistemáticamente. Después consideró la variación por adición de notas auxiliares y la conexión de diferentes formas de motivo. Otorgaba definiciones a términos como “motivo”, “frase”, “antecedente” y “consecuente”, “periodo”, “oración” y “sección”, etc. Creó términos como el de liquidación, por el que una unidad pierde gradualmente su distintivo característico hasta quedar sólo un residuo.

Lo más influyente es su división del motivo en elemento. El elemento es un intervalo simple que es la razón fundamental para un modelo de notas y se somete a repetición, transposición, inversión, multiplicación interna, ampliación, contracción y muchos otros procesos.

Varios analistas han seguido su idea: destacan Rudolf Reti y Hermann Keller que elevan el concepto de simple motivo fundamental al rango de unidad característica. [Ratz \(1951\)](#) intentó resolver el “misterio oculto” de las obras no fugadas para teclado. Para ello abordó mediante análisis comparativo las invenciones a dos y tres voces de Bach y las últimas sonatas de Beethoven. Distinguía dos tipos constructivos: el fijo (en temas principales y codas) y el libre (en el resto de las secciones).

Buscando una síntesis de las ideas de Schoenberg y Schenker, David [Epstein \(1979\)](#) aprovechaba el término schoenbergiano de “forma básica” para el análisis de la música clásica y romántica, prestando atención a las conexiones musicales entre tempo y estructura rítmica, y a la ambigüedad como fuerza estructural.

Según [Artaza \(2001\)](#), Walter Frisch en 1984, recogió el concepto de variación por desarrollo, y lo aplicó a Brahms. Este término se aplica al principio por el que los ingredientes estructurales de los temas sólo se repetían de manera variada, algunos experimentando modificaciones en sus elementos internos en cada reexposición. Tales cambios deparaban variantes que podían originar un nuevo motivo a su vez.

---

## 2.7 Disentimiento del empirismo

---

La contribución británica la aporta [Tovey \(1931\)](#), que llevó la contraria a la mayor parte de los dogmas de su tiempo. Criticaba la sistemática musical, es decir a los teóricos de la armonía, y a la lógica matemática de Schoenberg. No desmentía la existencia de la organización temática si ésta se presenta en contraste. También criticó a los formalistas. Descartó los términos “Primer Tema” y “Segundo Tema” por sólo “Tema”, “Oración”, “Melodía” o “Tonada”. Desde su óptica, las formas de Haydn, Mozart o Beethoven no eran moldes en los que la música se podía vaciar sino principios internos mediante los cuales la música crecía, y acusó a los teóricos de confundir lo “normal” con lo “usual”, ya que lo normal puede ser extremadamente raro, y la libertad es una función de normalidad, no un principio opuesto.

Describió la forma sonata como un sistema tonal y un sistema de frase, que sólo pueden tomarse para el análisis técnico, y capacidad dramática, que sólo se discute descriptivamente.

Sus escritos, repletos de metáforas, comenzaron siendo notas al programa y se ordenan por géneros y en orden cronológico. Abarca los siglos XVIII y XIX y está

## CAPÍTULO 2. BREVE EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL ANÁLISIS

---

directamente dirigido a lo que llamaba el oyente cándido, un lector aficionado pero abierto a experiencias, porque si una característica no era percibida por un oído inexperto no era digna de ser observada.

Fue denostado en 1950 pero desde la década de los 70 se ha revalorizado entre ciertos estudiosos como Rosen (1980, 1986) y Kerman (1965), considerándole un prototipo de aquellas especies de musicología que fusionan la objetividad del historiador con la experiencia personal del crítico.

### 2.8 1945-1960. Unidades lingüísticas, cibernéticas y temáticas

---

Después de la 2ª Guerra Mundial, existen dos líneas de pensamiento que afectan a la teoría musical:

- Lingüística: fundada por Ferdinand de Saussure, comenzó a influir en los años 30 y 40 e impactó en los 50 y 60 en conjunto con la semiótica y el estructuralismo. Examina la comunicación social a través del lenguaje natural, intentando descubrir las reglas por las que surte efecto un lenguaje dado y el proceso por el que los individuos aprenden intuitivamente las reglas de su propio lenguaje. Avanza por tres círculos:
  - Praga: con Roman Jakobson y N. S. Trubetzkó.
  - Copenhague: con H. Jørgensen.
  - Estados Unidos: con Zellig Harris y Noam Chomsky.

La semiótica trata los medios en los que los seres humanos se comunican unos con otros mediante códigos que contienen mensajes descifrables por los que conocen el código.

El estructuralismo observa los fenómenos sociales como estructuras cuyos elementos se rigen por leyes bien definidas.

- La cibernética y la teoría de la información: se crea a final de los años 40 con la obra de N. Wiener y C. Shannon y W. Weaver. Ve todas las actividades como sistemas de control.

Los primeros 15 años de posguerra, también vieron triunfar el concepto de crecimiento motivico musical, y su reorganización dentro de la teoría analítica, admitiendo elementos de Freud y el concepto de subconsciente colectivo de Jung, que durante los años 60 figuraba en los análisis.

La primera contribución en cualquiera de las nuevas esferas de pensamiento la hizo Gustav Becking (1918), desarrollando la fonología (ciencia que distingue y trata de comprender las normas por las que se enlazan los sonidos) y aplicándola a la música. Se aplicó en los países no occidentales ilustrando las diferentes construcciones que las gentes de las diferentes culturas del mundo colocan en un simple sonido musical dado. Estableció una tipología de sistemas, tales como “unidimensional”, “bidimensional”, “tridimensional” y

## 2.8. 1945-1960. UNIDADES LINGÜÍSTICAS, CIBERNÉTICAS Y TEMÁTICAS

---

“tetradimensional”. A este respecto, Roman Jakobson enfatizó la idea de que la música está basada en convenciones fonológicas

Milos Weingart (1945) exploró las analogías entre lenguaje musical y estructura de frase con referencia a Checoslovaquia y Antonin Sychra (1949) examinaba canciones populares mediante métodos lingüísticos.

Meyer (1956) se acercó a la teoría de la información en su visión de los estilos como sistemas de expectación condicionados culturalmente, y del propósito musical como derivado del estímulo, que frustra y hace cumplir tal estímulo, que frustra y hace cumplir tales expectativas.

En relación a la teoría de la información y su aplicación a la música, Meyer utilizaba tres etapas, llamadas intención expresa:

- Intención hipotética: antes de haber sido escuchado un motivo sonoro.
- Intención evidente: cuando el modelo sonoro se convierte en un acontecimiento concreto.
- Intención resuelta: surge tras la experiencia total.

Reti (1965), basándose en los Fundamentos de Composición de Schoenberg, elaboró un sistema de células logradas por reducción del material temático. Cada célula es el contorno de un motivo y contiene uno, dos o tres intervalos, presentados sin valores rítmicos. Cada célula puede ser transpuesta e invertida, pero muchas de ellas juntas forman lo que se llama modelo temático.

Reti también elabora un examen histórico del proceso temático y define un nuevo tipo de tonalidad, la pantonalidad o tónica móvil.

Keller (2001) propone el llamado “análisis funcional sin palabras”, que intenta elucidar las funciones de unificación del organismo vivo que es una obra de arte musical. Veía su trabajo analítico como el objetivo puramente aislador de unidades de fondo, y refutaba enérgicamente la carga de subjetividad. Añade la idea del fondo suprimido, necesaria para demostrar que la unidad de lo que sigue pueda ser demostrada. Para él, los contrastes eran “evidentes” y la unidad oculta era “latente”. Ésta idea era distinta de la de Schenker porque para éste la estructura era “lo compuesto terminado”, mientras que el fondo de Keller incluía una idea siempre presente, un modelo que contiene todos los elementos comunes de todos los temas de la pieza. Y elaboró una partitura analítica en vez de gráficos o signos.

Forte (1995) desarrolló la idea del motivo, considerado no sólo para actuar en la superficie sino también en el nivel del plano medio.

A finales de los años 50 hubo avances en el análisis lingüístico a cargo de Bruno Nettle y Nicolás Ruwet, que pretendía definir los problemas ambientales de escucha para la música serial integral, refiriéndose a la fonología y a la necesidad de un margen de error de los fenómenos de un sistema fonemático.

Estos estudios influyeron también en compositores, como Pierre Schaeffer cuando registró el sonido natural y creó la música concreta, o en la llamada “teoría de la

## CAPÍTULO 2. BREVE EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL ANÁLISIS

---

probabilidad” de [Hiller \(1958\)](#), mediante la que se creaban composiciones de manera mecánica.

También resurgió Schenker, con tratados de Adele Katz (1945) y Félix Salzer (1983) así como la hermenéutica mediante Deryck Cooke (1959), que pedía un vocabulario específico de contornos interválicos con las connotaciones de estados emocionales.

### 2.9 1960-1975. Teoría de conjuntos y ordenadores

---

A pesar de la grandísima cantidad de escritos analíticos desde 1960, sólo hay dos nuevos factores significativos que se hayan introducido en esos años.

- Teoría matemática de conjuntos. Su concepto se basa en ser miembro. Un conjunto está formado por elementos miembros de ese conjunto. El conjunto puede contener subconjuntos, cuyos elementos son todos miembros del mismo conjunto. Y en donde existen varios conjuntos pueden aplicarse varias relaciones entre ellos:
  - De intersección: con elementos comunes.
  - De equivalencia: cuando uno se puede reducir en otro mediante un procedimiento sencillo.
  - De unión: cuando se reúnen los conjuntos.
  - De complementación: cuando no hay elementos comunes, y unidos constituyen elementos de un orden mayor, etc.

Era aplicable a la música serial por su carácter matemático.

- Uso del ordenador digital: puede calcular y producir estadísticas y también puede comparar y detectar diferencias. En resumen, puede deducir una sintaxis por el comportamiento de una obra dada o de un estilo.

También se introduce la fenomenología, que se define como una ciencia de experiencia. Se encarga del contacto entre el objeto y la mente. Estudia el conocimiento directo para con los objetos (intencionalidad) y apunta a describir la estructura del conocimiento.

La mayor obra de este tipo de música es de Ernest Ansermet. Ordenando mediante la matemática consigue un estudio de estructuras que centra en el llamado camino melódico. Clasificando los intervalos como “extrovertido activo”, “introvertido activo”, “extrovertido pasivo” e “introvertido pasivo”, trata de dar un valor para el grado de tensión en la melodía.

Junto a estos nuevos planteamientos, hubo un crescendo de actividad en análisis lingüístico, una mengua en la teoría de la información, un similar número de análisis funcionales y un continuo resurgir de la obra de Schenker. También hubo algún independiente como Albert B. Lord (que examina el mecanismo por el que un cantor crea o recrea espontáneamente una canción), y Milman Parry sobre la capacidad de las fórmulas creadas por el tema para agruparse en “sistemas”, que proveen al cantor con

## 2.9. 1960-1975. TEORÍA DE CONJUNTOS Y ORDENADORES

---

alternativas para emparejarse en diferentes situaciones métricas en la poesía que está creando.

Aunque la teoría de conjuntos ya existía en Webern y Hauer, hay avances interesantes en Rochberg y Pierre Boulez. Pero la formulación precisa la da Milton Babbitt, Donald Martino, David Lewin y John Rothgeb. Aunque Babbitt se ha ocupado de la armonía y de las funciones de las configuraciones rítmicas y melódicas de las 12 notas, su interés es más compositivo que analítico. Es Forte (1995) el que ha ampliado el concepto de conjunto de tipo de altura sonora y sus relaciones para incluir la asociación de conjuntos en conjuntos complejos y subcomplejos. Este concepto adicional establece analogía con la tonalidad. Así se han analizado obras como “La Consagración de la Primavera”, por Forte en 1978 y “Wozzeck”, por Schmalfeldt, en 1983.

Mediante el ordenador, Forte hizo una lista tal de conjuntos complejos que ha permitido la formulación de una sintaxis de estas composiciones y para estilos individuales. El método de Forte sobre el análisis de la teoría de conjuntos se ha llevado a cabo de diversos modos en microordenadores y ha sido comercializado para ordenadores personales. El uso del ordenador se remonta a 1949 cuando Bernard Bronson analizaba extensión, métrica, modalidad, estructura de frase, estribillo modelo, contorno melódico, anacrusas, cadencias y finales de canciones populares con fines de estadística musical.

Había dos revistas en torno a este tema que se produjeron a la vez:

- Computers and Humanities: con guía de ordenadores y programas.
- Ensayos bajo la dirección de H. Hackmann, con lenguajes para representación musical, análisis de muestra y estrategias de análisis por ordenador.

El estudio más importante fue el de Iannis Xenakis “Musiques Formelles” de 1963, con referencias a probabilidades, estocásticas, cadenas ocultas de Markov y teorías de juegos con fines compositivos, pero ofreciendo leyes precisas que dan a la música un carácter universal. Propone un mundo sonoro repleto de galaxias y nubes gobernadas por la densidad, grado de orden y grado de cambio. Tan sólo analizó un compás y medio de la Sonata Appassionata de Beethoven sometido al llamado álgebra vectorial (un lenguaje de trabajo que puede admitir ambos análisis: el de las obras del pasado y el de las nuevas construcciones mediante la creación de interactuaciones en las funciones de los componentes).

En relación con Xenakis, se encuentra el “Tratado de objetos musicales” de Pierre Schaeffer de 1966, que en realidad es una disertación sobre el material sonoro con el que está hecha la música: un intento de presentar una tipología completa de dicho material y de descubrir sus leyes generales. Formula un “Solfeo de los objetos musicales”, que es un sistema de clasificación mediante siete criterios: masa, dinámica, timbre armónico, perfil melódico, perfil de masa, fibra y proceder.

En París, el análisis alcanza su esfera más multidisciplinar pues allí trabajan el equipo de ingenieros, matemáticos, psicólogos y filósofos de Xenakis; el equipo de Radio France de Schaeffer y el de Boulez en el Centro Pompidou. En el IRCAM (centro perteneciente al Pompidou) comenzó sus investigaciones en base a cuatro departamentos:



## CAPÍTULO 2. BREVE EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL ANÁLISIS

---

- Instrumental y vocal: encabezado por Luciano Berio.
- Síntesis por Jean-Claude Risset.
- Análisis, también por Jean-Claude Risset.
- Unidad móvil, por Diego Masson.

Actualmente existen diversos departamentos de investigación dentro del IRCAM (<http://www.ircam.fr/equipes.html>) entre los que cabe citar como más relacionados con nuestro trabajo a:

- Representaciones musicales.
- Análisis de las prácticas musicales.

Conviene añadir también a un equipo de la universidad de Princeton, encabezado por Benjamin Boretz, y el Grupo de Recursos de Semiología Musical de la Universidad de Montreal, fundado en 1974 por Jean Jacques Nattiez. En ese grupo, Nicolás Ruwet en 1974 publicó un libro en el que se tomaba una melodía sencilla y pasaba a segmentarla toscamente y continuaba la segmentación a través de una secuencia de reglas transformadoras que reconocían un efecto de semejanzas y equivalencias. Esta depara un análisis de estructura de frase que resulta una sintaxis de la melodía, cuyo éxito no era tanto la calidad del análisis terminado como el hecho de que aquello se había producido por un procedimiento exacto y verificable.

Ruwet partió de unidades de dimensiones medias “nivel I”, subdividiéndola en “nivel II”, y reconstituyendo entonces el “nivel I” previa unión de sus unidades para abarcar una gran escala: “nivel 0”.

También se intentó llevar a cabo un método de análisis auditivo mediante principios estructuralistas, a cargo de Chiarucci, en 1973, pero este análisis quedó en un terreno muy descuidado por no disponer de una teoría sistemática para poder procesar la entrada del sonido musical mediante los ordenadores.

Norbert Böker-Heil, mediante sofisticadas técnicas, intentó definir y diferenciar estilos. Bajo la dirección de Arthur Mendel y Lewis Lockwood, un proyecto de la Universidad de Princeton, aspiraba a definir el estilo de Josquin des Prés, mediante el estudio de las simultaneidades (efectos armónicos) y de las formaciones de suspensión, comparando las variantes de las diversas fuentes de una pieza sencilla, y determinar la filiación entre las fuentes y su autoridad comparativa.

En paralelo, se dio un interés en el resurgir del análisis de estilo, a cargo de Crocker (1986) y Rue (1989).

También se ha trabajado sobre la proporción de la estructura musical, en particular en la división de las obras en secciones áureas: Lendvai (1971) detallando, contando las corcheas, las diferentes construcciones áureas en la música de Bartók. De manera similar, se han realizado estudios del llamado análisis proporcional en obras de Ockenghems, por Marianne Henze en 1964; Philippe de Vitry, por Ernest Sanders, en 1975; de Dunstable, por Brian Trowell, en 1978 y de Debussy, por Roy Howat en 1983. También se han

---

## 2.10. DESDE 1975. GRAMÁTICAS MUSICALES

---

relacionado números cabalísticos tales como el 888 para el nombre de Jesús, o el 14 para la suma de las palabras que componen el nombre de Bach. Estos análisis son creíbles o no en relación a la cantidad de veces que aparecen en la obra de un compositor y a aspectos externos como bocetos u otros.

Schenker también sigue con gran fuerza. Fueron [Salzer \(1983\)](#) y [Mitchell \(1972\)](#) quienes siguieron su estudio pero ampliándolo a la música renacentista, romántica tardía y contemporánea.

[Meyer \(1956\)](#) busca el tratado llamado análisis crítico que trata de descubrir lo que resulta singular en una obra, a diferencia de la teoría musical, que busca descubrir los principios que gobiernan estilos y estructuras.

[Narmour \(1992\)](#), discípulo de Meyer, extrajo un nuevo modelo, llamado “realización de la implicación”, que sistematiza las estructuras melódicas que despiertan expectativas particulares.

En un sentido independiente, cabe destacar las obras de Charles Rosen de 1980 y 1986, cuestionando las ortodoxias de su tiempo con crítica mordaz, y la obra de Lomas sobre la “métrica del canto” (cantométrica), en la que ofrece una clasificación similar a la de [Rue \(1989\)](#), pero adaptada al análisis de la canciones no europeas.

---

## 2.10 Desde 1975. Gramáticas musicales

---

En la década de los 70 hay un torrente de nuevas revistas dedicadas en su gran mayoría, exclusivamente al análisis.

La universidad de Michigan funda una teoría de estructura musical ([Berry, 1987](#)). Ésta es receptiva a los conceptos de jerarquía, linealidad y nivel de Schenker, manteniendo una clara independencia de realización en procedimiento y terminología. Es esencial para su progresión la tétrada progresión, recesión, sucesión, y éxtasis. Las tres primeras denotan dirección y la cuarta, ausencia de ella. Su término es fluctuación y puede ser progresiva o recesiva. Tales fluctuaciones crean sentido de distancia y dan origen a la sensación de estabilidad e inestabilidad. También se emplean estos términos para la textura, el ritmo y la métrica. Pueden trabajarse de forma complementaria o compensatoria, en paralelo o para contrarrestar. Mediante su método, puede vislumbrarse como meta a largo plazo un particular punto de culminante de complejidad estructural, aunque se vislumbran otros puntos culminantes como subordinados o preparatorios de aquel. Por tanto, puede existir un entretejido profundo tanto de textura como de tonalidad.

El tratamiento de Berry de la sustancia musical atribuye la posibilidad de que los cambios que experimente tal elemento en el transcurso de una pieza puedan construir un “elemento estructura”. Reconoce la ambivalencia de los acontecimientos armónicos: una armonía sencilla puede desempeñar diferentes funciones en niveles de estructura diferentes, y son aplicables a cualquier tipo de música.

El análisis de la música entendida como material sonoro ha quedado relativamente sin desarrollar, aparte de Pierre Schaeffer en 1959 y 1966, Lasse Thorensen y Ulav

## CAPÍTULO 2. BREVE EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL ANÁLISIS

---

Anton Thommessen, quienes formularon en los 80 un lenguaje verbal y simbólico para la descripción de la forma de las cualidades sonoras.

Por otro lado, se hizo un análisis fonológico, tal y como se realizaba en la lingüística, para investigar el diseño sonoro. Se afirma que las composiciones son tanto formaciones de forma sonora básica como materiales tonales o rítmicos, y que los compositores han dejado huellas que pueden descubrirse con tecnología adecuada. Hacen gráficos para ilustrar el color tonal y se subsume dentro de un método que describe las estructuras musicales de la forma. El Watson Research Centre de IBM creó el análisis del espectro sonoro, que podía fotocopiar el contenido sonoro de una composición completa.

Noam Chomsky, crea un sistema para generar palabras de lenguaje natural. De estas, el modelo transformador es el más global. Parte de la base de que todos los seres humanos poseen una capacidad intelectual innata de los principios formales de la sintaxis y que esta capacidad es “universal” y sirve de base a todos los lenguajes.

Comprende un conjunto de reglas dispuestas en tres grupos que llaman componentes. Un sistema se compone de cuatro partes fundamentales:

- Un conjunto de símbolos.
- Las reglas para combinar estos símbolos como expresiones.
- Ciertas combinaciones de tales símbolos que forman axiomas.
- Reglas por las que se pueden hacer afirmaciones deducidas a partir de estos axiomas.

Un sistema tiene un número de símbolos finito y es capaz de generar un número infinito de oraciones de un lenguaje natural gramaticalmente bien formadas. La gramática generadora de Chomsky es un sistema formal que postula la existencia de una estructura profunda mediante la que las palabras que son diferentes en su estructura superficial pueden ser similares.

Bajo su influencia, la cuestión de si la música tiene estructura profunda ha fascinado a los músicos. Primero fue Leonard Bernstein en 1973 y luego, en 1977 Fred Lerdahl y Ray Jackendoff ([Lerdahl and Jackendoff, 1985](#)), desarrollaron una teoría cuyo propósito era elucidar la organización que el oyente impone mentalmente a las señales físicas de la música tonal.

Basan su sistema en un conjunto de reglas que actúan con cuatro componentes. Son dimensiones y están jerarquizados en base a:

- Estructura de agrupación.
- Estructura métrica.
- Reducción del lapso de tiempo.
- Reducción de prolongación.

Cada categoría tiene dos tipos de reglas:

## 2.10. DESDE 1975. GRAMÁTICAS MUSICALES

---

- Reglas bien fundadas: que controlan la elaboración de posibles descripciones estructurales.
- Reglas prioritarias: determinan la cantidad de descripciones posibles correspondientes a las preferencias de un oyente.

Para demostrar el funcionamiento de estas reglas se adoptan tres formas gráficas convencionales. La estructura de agrupación se muestra mediante corchetes horizontales, y la estructura métrica mediante líneas de puntos; ambas por debajo del pentagrama y repetidas verticalmente para expresar la jerarquía; la reducción se muestra ramificando árboles sobre el pentagrama. Para la reducción de la prolongación y los tres diagramas se proporcionan círculos rellenos y huecos en los nudos para indicar el tipo de prolongación que representan las ramas, mientras que los niveles de reducción están expuestos inferiormente en pentagramas separados, adoptando los convencionalismos de la teoría de Schenker para las cabezas de nota rellenas y huecas y las señales de frases punteadas.

Con los ordenadores, se crearon reglas para sus sistemas en orden de grados ordenados como programas de ordenador. En 1967, M. Kassler, creó un sistema que incorporaba las reglas de las técnicas de Schenker. Se limita a tonalidades mayores y a dos voces. Proporciona tres axiomas (relaciones 3-1, 5-1, 8-1), y 13 reglas deductivas.

James Snell, creó un sistema basado en Schenker y en el ritmo, basado en tonos mayores y sólo generando música a dos voces.

Sobre un sistema semiótico, Mario Baroni y Carlo Jacoboni, trabajaron en 1973 en las melodías de J. S. Bach para los corales, dividían cada frase en tres funciones: negra inicial, cuerpo central y cadencia. Las posibilidades dentro de cada una eran expresadas según un conjunto de 30 reglas para determinar cuántas notas pueden producirse en una sucesión.

Más tarde reconocieron limitaciones en su sistema y lo modificaron en base a núcleos, reglas de inserción, etc.

Otto Laske creó otro sistema en 1981 basado en el “Syrinx” de Debussy que capta la entrada de sonido y lo segmenta en objetos sonoros.

# 3

## Análisis tonal

### 3.1 Introducción

---

El sistema de composición musical más importante y extenso de la historia de la música ha estado basado en la tonalidad, hasta tal punto que hoy en día se sigue utilizando asiduamente. Y aunque, evidentemente, no ha sido el único sistema de composición, sí que ha sobrevivido, por lo menos a nivel popular, a otros sistemas compositivos como el serialismo, el dodecafonismo, la música espectral, etc.

El sistema tonal no ha sido el primer sistema de composición musical que ha existido ni el último, ya que anteriormente a éste estaba el sistema modal, del que ha evolucionado hasta convertirse en tonal y, aunque han convivido juntos (incluso hoy en día), la técnica que se utiliza está basada en el sistema tonal más que en el sistema modal.

Por ejemplo, aunque se utilicen modos gregorianos o griegos (o cualquier otro modo), la armonización que se hace sobre el modo es tonal y no modal. Los acordes se realizan mediante superposición de terceras, los acordes incompletos son los que no poseen la quinta en vez de la tercera (como ocurría hasta el siglo XVI), se realizan cadencias en vez de cláusulas, el discurso armónico-musical se realiza en base a tensiones y distensiones, superponiendo al acorde sucesivas terceras, generando de esta manera acordes disonantes y, en consecuencia, acordes que nos genera tensión y que se resuelven en acordes estables o que no poseen disonancias, es decir en acordes distensionales.

Pero, incluso, la técnica de creación acórdica puede estar basada en otros conceptos como, por ejemplo, el descrito por [Lendvai \(1971\)](#) quien determina que el sistema de Bartok está basado en un sistema de ejes formando el acorde básico a partir de la superposición de cuartas (en lo que se puede traducir al sistema armónico tradicional como un acorde de séptima disminuida). O el sistema de Debussy donde se utilizan acordes pantonales y mixturas.

La tonalidad en sí nace junto con el concepto ideado por Galileo Galilei que determinaba que la Tierra gira alrededor del Sol durante el primer barroco musical (entorno a 1600) entendiéndose análogamente que al igual que los planetas giran alrededor del Sol y que los satélites (las lunas) giran alrededor de los planetas se establece una jerarquización en donde unos acordes giran alrededor de un acorde principal o acorde eje llamado Tónica y que da nombre a la tonalidad, existiendo además otros acordes (secundarios) que pueden girar en torno a los acordes fundamentales que giran alrededor del acorde Tónica. Al igual que hemos determinado el concepto de tonalidad dentro de

## CAPÍTULO 3. ANÁLISIS TONAL

---

la música, este concepto está basado en la sucesión de acordes y de la interacción que poseen entre sí dichos acordes, a lo que denominamos armonía.

La armonía podemos entenderla como el conjunto de pilares arquitectónicos que sostienen toda la obra musical. Evidentemente, esos “pilares” se pueden crear de innumerables maneras y evolucionarán conforme al ámbito histórico en que se utilicen, al igual que serán distintos según la geografía en la que estén e incluso al propio compositor en cuestión.

En nuestro caso nos vamos a ceñir única y exclusivamente a los corales armonizados de J. S. Bach, haciendo hincapié en que una vez que el sistema funcione en el entorno determinado de estos corales, este puede también funcionar en otro entorno. Para ello, tan sólo hay que adaptarlo con las nuevas reglas o incluir las evoluciones musicales del nuevo entorno musical.

En concreto, en este trabajo, el objetivo principal que se pretende es conseguir el análisis tonal, melódico, acórdico y funcional, a partir de una partitura, mediante un sistema computacional, como se observa en la Figura 3.1.

The image shows a musical score in C major, 4/4 time, consisting of two staves (treble and bass clef). The melody in the treble clef starts with a G4 quarter note, followed by a quarter rest, then an A4 quarter note with a sharp sign, then a B4 quarter note, and finally a C5 quarter note. The bass line starts with a G3 quarter note, followed by an F3 quarter note, then an E3 quarter note, and finally a D3 quarter note. Above the treble staff, the chord B7 is indicated above the first measure, and (D7) is indicated above the second measure. Below the bass staff, the chord symbols i, V<sub>5</sub><sup>7</sup><sub>4,3</sub>, <sup>b</sup>VI, I<sup>6</sup>, V<sub>4,3</sub><sup>7</sup>, and I are written below the notes.

Figura 3.1: Ejemplo de análisis tonal (Czarnecki, 2014).

Las melodías objeto de nuestro estudio deberán estar sujetas a las reglas de la tonalidad. Cualquier melodía que no sea tonal no puede analizarse con el sistema que se propone.

Debido a la complejidad y a las variables que afectan a una melodía, este trabajo indicará las reglas escolásticas generales de una melodía, jerarquizándolas y valorándolas.

### 3.1.1. Enfoque computacional propuesto para el análisis tonal

El sistema analítico computacional que se va a implementar es un sistema basado en reglas. Las reglas pueden desarrollarse según las características compositivas propias de cada compositor, o en las reglas que rigen una época determinada. En este trabajo nos centramos en las técnicas de J. S. Bach y lo cotejamos con sus corales armonizados.

Para el análisis de una pieza musical, el sistema realiza los pasos siguientes. En primer lugar, se realiza un análisis melódico, en donde las notas son etiquetadas como notas reales (*harmonic tones*) para aquellas que pertenecen a la armonía actual en cada momento, o como notas extrañas (*non-harmonic tones*) para aquellas notas ornamentales. Puede haber notas con un etiquetado ambiguo, es decir, que tengan la posibilidad de ser notas reales y extrañas, teniendo éstas que ser etiquetadas en un

## 3.2. ETIQUETADO DE NOTAS O ANÁLISIS MELÓDICO

---

posterior proceso, cuando se disponga de la información necesaria para desambiguar el etiquetado, gracias a la concurrencia de informaciones extraídas en otras sub-tareas del análisis, como las que se describen a continuación.

A continuación, se realiza un análisis vertical de la obra: tras segmentar cada compás en varias ventanas temporales, se obtienen todos los acordes posibles a partir de las notas presentes en cada ventana individual.

El tercer paso del análisis elige cuál de entre las 24 tonalidades distintas son posibles candidatas para ser la tonalidad central de cada ventana, dadas las alteraciones de las notas involucradas.

El cuarto paso tiene como entrada todos los acordes y tonalidades posibles para cada ventana. De esos datos, se construye un grafo dirigido acíclico ponderado (*weighted acyclic directed graph* - wDAG) organizado por capas (sin bucles ni aristas hacia capas anteriores). Cada capa representa una ventana. Los nodos del grafo corresponden a los acordes con su función tonal en una determinada tonalidad. Las aristas del grafo contienen las progresiones válidas entre los nodos en las sucesivas capas, ponderados de acuerdo a la importancia de esas progresiones con el fin de establecer la tonalidad. Por ejemplo, las cadencias perfectas reciben una puntuación mayor que las semicadencias.

El último paso usa un algoritmo de programación dinámica para calcular el mejor camino en el grafo, descubriendo la mejor secuencia de tonalidades y funciones tonales. La salida de este paso es un análisis en números romanos junto a la segmentación por tonalidades. Con esa información armónica, aquellas notas que tenían varios posibles análisis son resueltos.

En la Figura 3.2 se expone un diagrama representativo del entorno de este trabajo que se detallará en las siguientes secciones.

## 3.2 Etiquetado de notas o análisis melódico

---

Para realizar el análisis melódico, las variables que se tienen en cuenta son el compás, el pulso, el ritmo y la intervállica. La armonía será una variable deducible tras un primer análisis melódico. Aunque el itinerario seguido consista en analizar primero la melodía y después la armonía, el análisis inicial armónico contempla todos los posibles acordes resultantes incluyendo todas las notas, tanto las etiquetadas como notas reales como las notas extrañas.

El pulso es la subdivisión del tiempo en partes iguales. Consiste en una igualdad, donde se ajusta una figura rítmica en el lado izquierdo de la igualdad con un número. El número indica la cantidad de figuras rítmicas que entran en un minuto. De tal forma que si realizamos una igualdad de corchea igual a 120 ( $\♪ = 120$ ) en un minuto entrarían 120 corcheas. Por lo tanto, una corchea duraría medio segundo.

En este trabajo el pulso tiene una importancia muy significativa, ya que una de las evaluaciones que jerarquiza el carácter de una nota (identificándola como nota real o extraña) es el valor rítmico de ésta con respecto al pulso de la obra. Basándonos en este principio, en un compás cuaternario con un pulso de negra, una blanca estará más próxima a ser una nota real que una corchea.

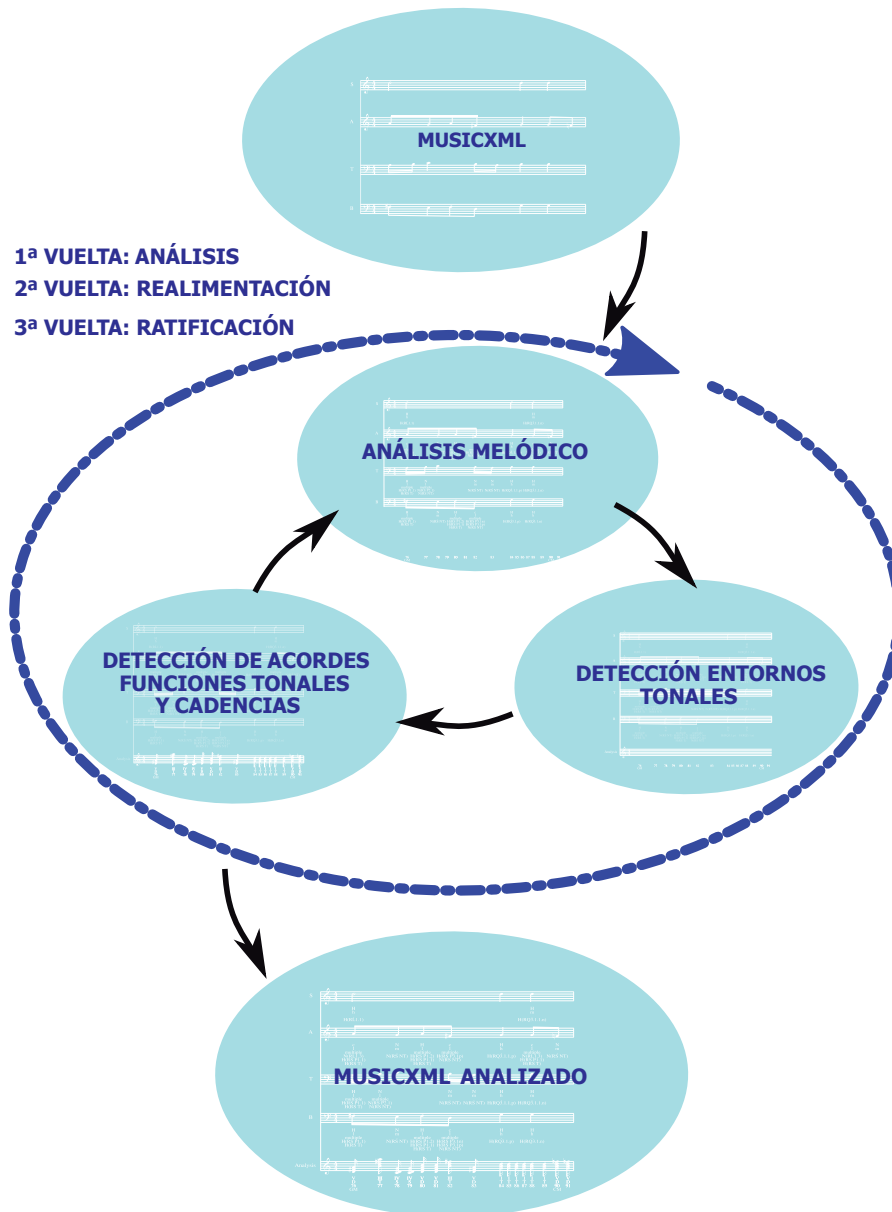


Figura 3.2: Gráfico representativo del diseño del motor para la realización del análisis de una partitura.

El compás es la encapsulación del pulso en tiempos regulares, jerarquizando los pulsos en tiempos fuertes y débiles. En este trabajo, además de la evaluación rítmica con el pulso, descrito en el párrafo anterior, se etiqueta las notas en base al compás cuaternario y al compás ternario. Los demás compases se deducen a partir de éstos.



## 3.2. ETIQUETADO DE NOTAS O ANÁLISIS MELÓDICO

---

El compás cuaternario está jerarquizado en cuatro niveles de importancia. La siguiente secuencia describe de mayor a menor nivel de importancia los pulsos establecidos en un compás cuaternario:

1. El nivel de importancia más alto es el primer tiempo del compás.
2. El segundo nivel de importancia es el tercer tiempo del compás.
3. El tercer nivel de importancia es el segundo tiempo del compás.
4. El nivel de importancia más bajo es el último tiempo del compás (el cuatro tiempo).

En un compás ternario, la importancia del tiempo coincide con su ubicación. Ésta viene en relación a la siguiente secuencia:

1. El nivel de importancia más alto es el primer tiempo.
2. El segundo nivel de importancia es el segundo tiempo.
3. El nivel más bajo de importancia es el tercer tiempo.

Los compases se pueden establecer como secuencias arbóreas rítmicas (véase Figura 3.3). El compás se establece en un nivel del árbol y la ramificación del nivel en un subnivel implica la subdivisión del compás. Por lo tanto una ramificación binaria implica un compás simple, es decir, un compás con numerador 2, 3 ó 4 y denominador típicamente 2, 4, 8 ó 16 y una ramificación ternaria implica un compás compuesto, es decir, un compás con numerador 6, 9 ó 12, siendo el denominador 8 el más comúnmente usado en este caso. La modificación del nivel ascendente o descendente relaciona un compás con otro. Manteniendo el esquema de los árboles, se puede deducir cualquier otro compás. Los compases de amalgama también pueden ser incluidos con este sistema.

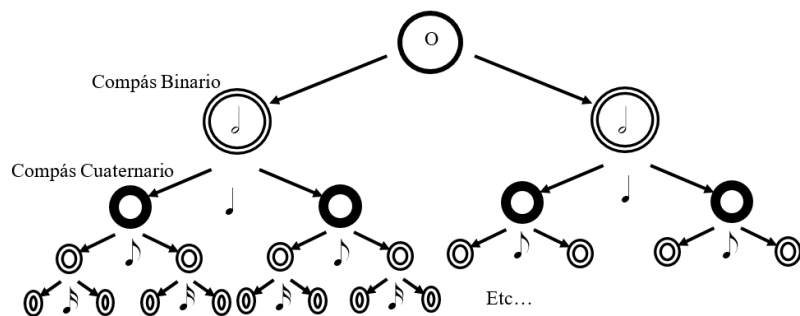
Por ejemplo, para relacionar los compases cuaternarios con los binarios, hay que subir un nivel en el árbol rítmico.

Los cuatro nodos que representan las notas negras en 3.3(a), además de notificar el valor rítmico de negra, hace referencia a la posición que ocupa en un compás, de tal forma que a la posición horizontal de la rama se le atribuye un nivel de importancia. Lo mismo ocurre con todos los nodos restantes. La estructura del árbol determina un criterio de calificación.

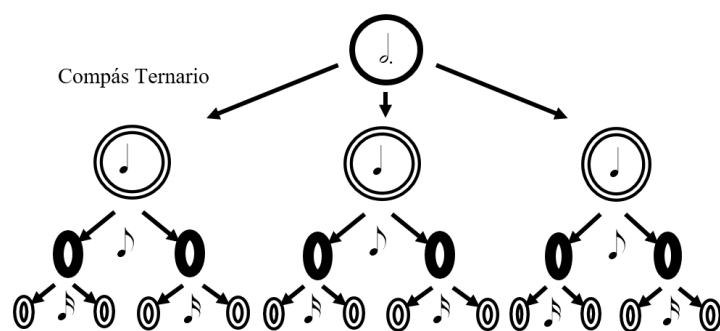
### 3.2.1. Definiciones

El sistema para el etiquetado de notas en notas reales o extrañas, como ya hemos comentado, está basado en reglas, las cuales a su vez se enuncian a partir de las siguientes definiciones:

**Definición 3.2.1** Duración relativa:  $rd(n_a) = duration(n_a)/duration(\text{pulso})$



(a) Esquema de árbol de ramificación binaria/cuaternaria (compases simples)



(b)

Esquema de árbol de ramificación ternaria (compases compuestos)

Figura 3.3: Árboles con sus respectivas ramificaciones, binarias y ternarias.

La función de *duración relativa* determina la relación de proporción entre la duración de una nota,  $n_a$ , y la del pulso. Es el denominado *ritmo* en música. El ritmo son los valores temporales que posee una nota musical. Este trabajo relaciona directamente el ritmo con el pulso, creando un coeficiente de importancia rítmica entre el ritmo de la nota y el pulso. Mediante esta ecuación se igualan los valores rítmicos de las notas al pulso de la obra. Por ejemplo, en un compás de cuatro por cuatro ( $\frac{4}{4}$ ), el  $rd(n_a)$  de una negra es 1 y en un compás de dos por dos ( $\frac{2}{2}$ ), el  $rd(n_a)$  de una blanca es 1 también.

Según la ecuación de la duración relativa, los valores rítmicos que sean superiores al pulso tendrán  $rd(n_a) > 1$  y los ritmos menores al pulso tendrán  $rd(n_a) < 1$ . Una nota tendrá más posibilidad de tener un carácter real cuanto mayor sea su  $rd(n_a)$  y, de forma recíproca, una nota tendrá más posibilidad de ser una nota extraña cuanto menor sea su  $rd(n_a)$ .

Además de la  $rd(n_a)$ , expresado por la ecuación anterior, la importancia de una nota viene determinada con respecto al entorno en que se ubica, estableciéndose una relación rítmica con las notas anterior y posterior. La siguiente ecuación determina la importancia de una nota con respecto a su entorno:

**Definición 3.2.2**  $ratio(n_i) = \frac{rd(n_i)}{rd(n_{i-1})} \times \frac{rd(n_i)}{rd(n_{i+1})}$

## 3.2. ETIQUETADO DE NOTAS O ANÁLISIS MELÓDICO

---

La función *ratio* se usa para comparar la duración relativa de una nota con su entorno, es decir, con las notas anterior y siguiente.

Según la ecuación de  $ratio(n_i)$ , una nota posee una mayor importancia, y por lo tanto un carácter real, cuando los valores rítmicos que le preceden y suceden son inferiores a ella. Es decir, cuando  $ratio(n_i) \geq 1$ . Recíprocamente, una nota posee una menor importancia y, por lo tanto, se puede considerar como nota extraña, cuando las notaciones rítmicas de las notas que le preceden y suceden son superiores a ésta. Es decir, cuando el  $ratio(n_i) \leq 1$ . El  $ratio(n_i)$  sólo nos determina la importancia de una nota con respecto a las notas de su contexto más inmediato, pero no nos determina si realmente la nota es real o extraña. El  $ratio(n_i)$  es utilizado para realizar un análisis más exhaustivo basado en reglas contrapuntísticas, donde es un factor a tener en cuenta al igual que ocurre con las demás variables consideradas.

**Definición 3.2.3**  $pitchName(n_a) \in \{C, D, E, F, G, A, B\}$

Define la posición del nombre de la nota  $n_a$  en el conjunto ordenado de etiquetas para las notas entre DO y SI. No incluye las alteraciones,  $\sharp$  y  $\flat$ .

**Definición 3.2.4**  $pitchClass(n_a) \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11\}$

Orden de una nota, dentro de una octava, incluyendo su alteración (por ejemplo  $pitchClass(Eb_4) = 3$ ).

**Definición 3.2.5**  $pitchInterval(n_a, n_b) = d, s \in \mathbb{Q}$  tal que  $100 \times d, s \in \mathbb{Z}$

Calcula el intervalo entre dos notas  $n_a$  y  $n_b$  especificando dos decimales, donde  $d = pitchName(n_b) - pitchName(n_a) + 1$  nos indica el nombre del intervalo que forma las notas, y  $s = pitchClass(n_b) - pitchClass(n_a)$  indica el número de semitonos que hay entre las notas. Por ejemplo, para el unísono, el  $pitchInterval(n_a, n_b) = 1,00$ ; para el cromatismo, el  $pitchInterval(n_a, n_b) = 1,01$ ; para la segunda menor el  $pitchInterval(n_a, n_b) = 2,01$ ; la segunda mayor equivale a  $pitchInterval(n_a, n_b) = 2,02$  y así sucesivamente.  $pitchInterval(n_a, n_b) = 4,06$  equivale al tritono (cuarta aumentada);  $pitchInterval(n_a, n_b) = 5,06$  equivale a la quinta disminuida.

Además se le atribuye un signo positivo o negativo indicando la direccionalidad del intervalo. El valor positivo “+” o la ausencia de signo indica que el intervalo es ascendente y el signo “-” indica que el intervalo es descendente. Por ejemplo  $pitchInterval(n_a, n_b) = +3,04$  indica que el intervalo es de tercera mayor ascendente;  $pitchInterval(n_a, n_b) = -4,05$  indica que el intervalo es de cuarta justa descendente.

La intervállica es la diferencia de altura que poseen las notas musicales. Esta variable, junto con las comentadas anteriormente, forman el conjunto que determina el etiquetado de notas, distinguiendo entre notas reales y notas extrañas. Para ello, la nota analizada se evalúa con su entorno interválico, es decir con el intervalo melódico anterior y con el posterior.

**Definición 3.2.6**  $prevI(n_i) = pitchInterval(n_{i-1}, n_i)$

## CAPÍTULO 3. ANÁLISIS TONAL

---

El intervalo previo es el intervalo entre una nota  $n_i$  y su predecesor.

**Definición 3.2.7**  $nextI(n_i) = pitchInterval(n_i, n_{i+1})$

El intervalo siguiente es el intervalo entre una nota  $n_i$  y su sucesor.

A partir de la determinación de los entornos interválticos y direccionales de la nota analizada, tanto con la nota anterior como con la posterior, se le atribuye el tipo de nota extraña que es.

**Definición 3.2.8**  $beat(n_i) \in \mathbb{N} \leq$  numerador del compás

Su valor es el pulso en el que ataca la nota, numerado entre 1 y el valor máximo en cada compás, que coincide con el numerador del tipo compás.

**Definición 3.2.9**  $subbeat(n_i) \in \mathbb{B}$

Es una función booleana que es cierta cuando el ataque de la nota no cae justo en la posición del pulso y en otro caso es falsa.

**Definición 3.2.10**  $strong(n_i) \in \mathbb{B}$

Para los compases cuaternarios la nota es fuerte cuando su ataque se sitúa en el primero o tercer tiempo del compás. En ritmos ternarios, es fuerte si y sólo si ataca en el primer tiempo. Para los compases compuestos, esta función se puede calcular de las dos situaciones anteriores.

**Definición 3.2.11**  $tied(n_i) \in \mathbb{B}$

Es una función booleana que es cierta cuando la nota  $n_i$  está ligada desde la nota anterior.

**Definición 3.2.12**  $part(n_i) \in \mathbb{N} \leq$  número de partes del compás

Es una subdivisión de un tiempo en dos partes para compases simples, y en tres para compuestos.

Las notas extrañas se catalogan según estén ubicadas en tiempos fuertes, débiles o en subtiempos y según los giros interválticos anteriores y posteriores, en distintas clases, dándonos al final un valor que nos indicará si la nota es real o extraña.

En general podemos encontrarnos situaciones en las que se puede aplicar distintos análisis posibles, en parte porque no disponemos aún del análisis armónico. Para poder gestionar esta situación añadimos grados de confianza al análisis melódico, que oscilarán entre cinco puntos. De menor a mayor son:

**NC.1** nivel de confianza muy bajo.

**NC.2** nivel de confianza bajo.

**NC.3** nivel de confianza medio.

**NC.4** nivel de confianza alto.

**NC.5** nivel de confianza muy alto.

## 3.2. ETIQUETADO DE NOTAS O ANÁLISIS MELÓDICO

### 3.2.2. Duración rítmica mayor que un pulso (un tiempo)

Usando las definiciones anteriores, definimos el conjunto de reglas que se detallan a continuación. Se ha dividido el espacio del problema en varias categorías basadas en la duración de la nota y su ubicación en el compás.

#### Primer tiempo

**(RL\_1.1)** Cuando una nota comienza en el primer tiempo de compás con un valor rítmico superior a un pulso, se clasifica como real con un nivel de confianza NC.5 (muy alto). No obstante cabe la posibilidad de que sea una nota extraña, bien una apoyatura, o bien un retardo (véase Figura 3.4). La diferencia entre retardo y apoyatura será la unión o no, respectivamente, de la nota analizada con su predecesora.

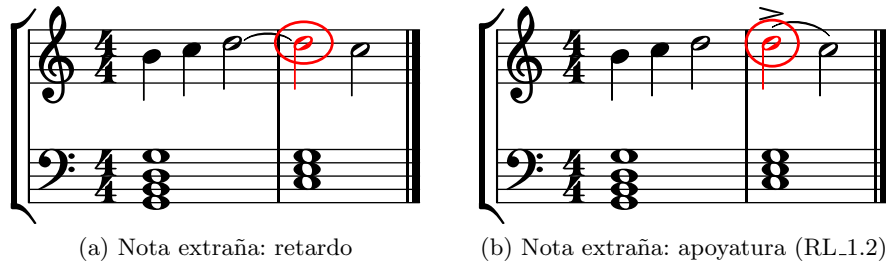


Figura 3.4: Excepciones de la regla RL\_1.1, diferenciando entre el retardo y la apoyatura.

**(RL\_1.2)** Para clasificar la nota como apoyatura (con confianza baja), se tiene que dar las siguientes condiciones:

- La siguiente nota tiene que estar a una interválica de segunda (mayor o menor) descendente y poseer una figuración rítmica como mínimo igual a un pulso. La nota anterior tiene que ser la misma nota que la que se analiza.
- (RL\_1.2.1) Si se cumple la condición RL1.2 pero el intervalo es de segunda menor ascendente el tratamiento sigue siendo de apoyatura, en el supuesto caso que venga ligada de la nota anterior, en vez de apoyatura será un retardo (aunque se da en ocasiones muy puntuales como puede ser la sensible por la tónica) (ej. Figura 3.5).

**(RL\_1.3)** Cabe la posibilidad de que la nota anterior esté a distancia de segunda mayor o menor ascendente o descendente (nivel de confianza NC.1) (ej. Figura 3.6).

**(RL\_1.4)** Si la nota tiene un valor rítmico igual al compás (4 tiempos en este caso) se considera siempre real (nivel de confianza NC.5).<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Nota genérica de esta sección: lo práctico, cuando una nota posee un valor superior a un pulso es clasificarla como real exceptuando la condición de interválica de la nota anterior igual a la analizada, e interválica de la nota posterior de segunda descendente.

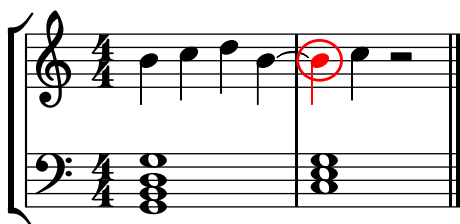


Figura 3.5: Retardo ascendente.

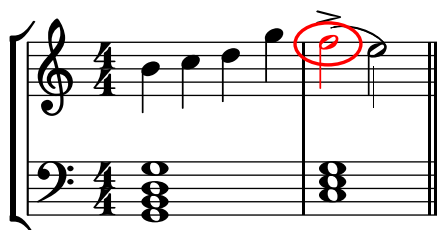


Figura 3.6: Apoyatura.

### Segundo tiempo

(**RL.2.1**) Cuando una nota comienza en el segundo tiempo de compás con un valor rítmico superior a un pulso, lo más probable es que haya que desdoblar la nota en dos notas ligadas. Una de ellas será real y la otra extraña (con probabilidad muy alta). Aunque puede darse el caso de que la nota sea al completo real o extraña (con probabilidad muy baja).

También puede ocurrir que la nota sea de dos armonías distintas (nota común). Para considerar esa nota como extraña, se tiene que dar algunas de las siguientes condiciones.

(**RL.2.2**) Nota Extraña (de paso): la interválica de la nota anterior y posterior tiene que ser de segunda. Además hay que comprobar que el ritmo armónico sea superior al valor de la nota analizada. Entonces se puede (aunque es discutible) afirmar que es una nota extraña (bien una bordadura o bien un paso). Muy poco probable (nivel de confianza NC.1) (ej. Figura 3.7).

(**RL.2.3**) El valor de la nota se desdobra en dos valores rítmicos ligados. Produciéndose generalmente un retardo en la segunda nota, (es el caso más probable, nivel de confianza NC.5) como representa la siguiente figura (ej. Figura 3.8).

La primera nota se produce como anticipación armónica (véase Figura 3.9).

Para considerarla real con el máximo nivel de confianza, las interválicas de las notas anterior y posterior tiene que ser superior a una segunda (véase Figura 3.10).

### 3.2. ETIQUETADO DE NOTAS O ANÁLISIS MELÓDICO

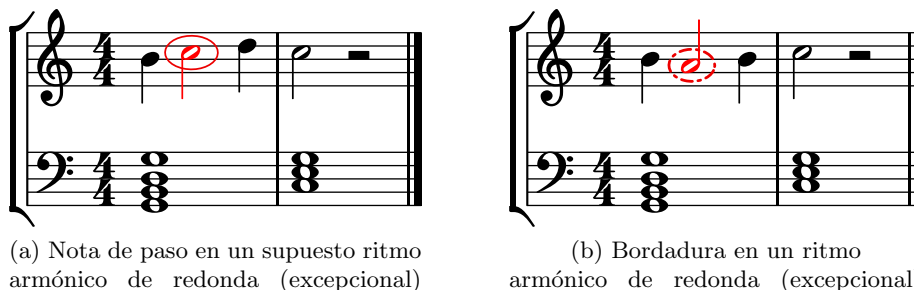


Figura 3.7: Ejemplos excepcionales de notas extrañas con un valor rítmico superior al pulso.

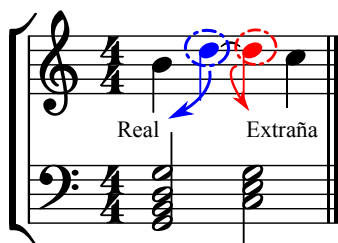


Figura 3.8: Desdoble rítmico de la nota siendo la primera parte real y la segunda retardo en un ritmo armónico de blancas.

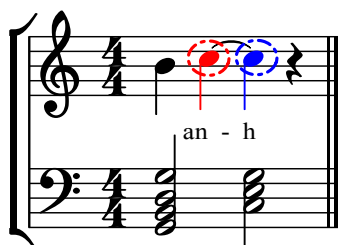


Figura 3.9: Armonía oblicua justificándose como desdoble rítmico de la nota, siendo la primera parte anticipación y la segunda parte real en un ritmo armónico de blancas.



Figura 3.10: Nota real por tener un intervalo melódico anterior y/o posterior superior a la segunda.

## CAPÍTULO 3. ANÁLISIS TONAL

---

### Tercer tiempo

**(RL\_3.1)** Cuando una nota comienza en el tercer tiempo de compás con un valor rítmico superior a un pulso, se clasifica como real con un nivel de confianza NC.5 (véase Figura 3.11).

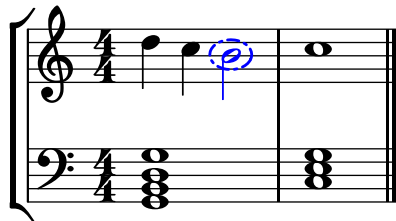


Figura 3.11: Nota real en un ritmo armónico de redondas.

**(RL\_3.2)** Si su valor rítmico es de dos tiempos (blanca) y el valor rítmico de la nota anterior es inferior a ésta, se considera, con un nivel de confianza NC.5, como real (véase Figura 3.12).



Figura 3.12: Nota real en un ritmo armónico de blancas

**(RL\_3.3)** También se considera, con un nivel de confianza NC5, como real si la interválica de la nota anterior es superior a una segunda (con valor rítmico igual o inferior a ésta) (véase Figura 3.13).

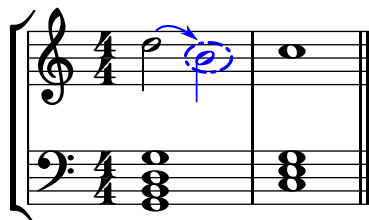


Figura 3.13: Nota real por ser el intervalo anterior superior a una segunda.



## 3.2. ETIQUETADO DE NOTAS O ANÁLISIS MELÓDICO

(RL\_3.4) Aún lo anterior, cabe la posibilidad de que, al igual que ocurre con el primer tiempo, sea una apoyatura o un retardo. Para que se dé uno de estos casos, además de cumplir los requisitos del apartado del primer tiempo, la nota tiene que tener una duración de 1.5 tiempos, siendo lo más probable que la nota extraña sea la corchea, y el ritmo armónico debe de ser a tempo o superior al tempo (en el caso de la apoyatura) (véanse las reglas (RL\_1.2), (RL\_1.3) y (RL\_1.4) de la Figura 3.14).

Figure 3.14 consists of two musical examples, (a) and (b), in 4/4 time. Example (a) shows a melody in the treble clef with a suspension (S) on the second beat. The suspension is a dotted quarter note (1.5 beats) on G4, which is a half note (h) in the previous measure. The suspension is marked with a blue circle and a red 'S'. The first section of the suspension is marked with a blue circle and 'h', and the second section with a red circle and 's'. The bass line consists of chords: C4-E4-G4, C4-E4-G4, C4-E4-G4, and C4-E4-G4. Example (b) shows a melody in the treble clef with a grace note on the second beat. The grace note is a quarter note (0.5 beats) on G4, which is a half note (h) in the previous measure. The grace note is marked with a red circle and a red 'h'. The main note on the second beat is a dotted quarter note (1.5 beats) on G4, which is a half note (h) in the previous measure. The bass line consists of chords: C4-E4-G4, C4-E4-G4, C4-E4-G4, and C4-E4-G4.

(a) Desdoble rítmico de la nota, siendo la primera real y la segunda sección retardo en un ritmo armónico de negras.

(b) Apoyatura.

Figura 3.14: Ejemplos de retardo (*suspension* (S) y apoyatura. La nota real se indica con la inicial h (*harmonic tone*).

### Cuarto tiempo

(RL\_4.1) Cuando una nota comienza en el cuarto tiempo de compás con un valor rítmico superior a un pulso, se clasifica la primera sección de la nota como real con un nivel de confianza alto (NC.4) o muy alto (NC.5) (véase Figura 3.15).

Figure 3.15 shows a musical example in 4/4 time. The melody in the treble clef starts with a quarter note (0.5 beats) on G4 in the fourth beat of the first measure. This note is marked with a blue circle and a blue 'h'. The rest of the melody consists of quarter notes: A4, B4, and C5. The bass line consists of chords: C4-E4-G4, C4-E4-G4, C4-E4-G4, and C4-E4-G4.

Figura 3.15: Primera sección de la nota como real en un ritmo armónico de redondas.

(RL\_4.2) Cabe la posibilidad de nota común. Esta regla necesita el análisis armónico, en el que la nota analizada es nota común a dos o más armonías contiguas (véase Figura 3.16).

(RL\_4.3) Al igual que ocurre con el tercer tiempo, está la posibilidad de que el segundo valor de la nota sea extraña (véase Figura 3.17).

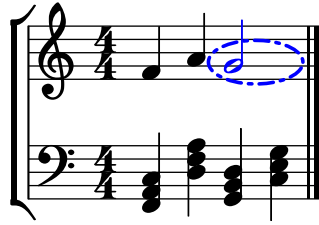


Figura 3.16: Nota común entre dos armonías, analizando el cuarto tiempo y con un valor rítmico global superior al pulso.

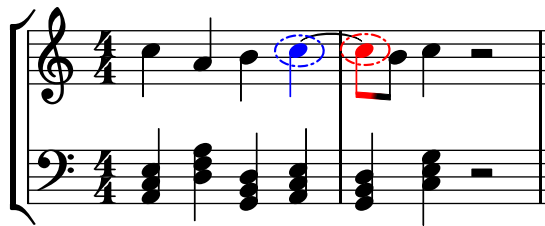


Figura 3.17: Desdoble rítmico de la nota siendo la primera parte nota real y la segunda retardo.

(RL\_4.4) Anticipación: en este caso se considera nota extraña al no pertenecer a la armonía subyacente, sino a la armonía siguiente (véase Figura 3.18).

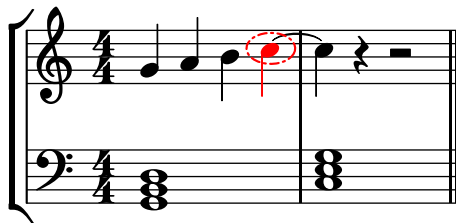


Figura 3.18: Desdoble rítmico de la nota, siendo la primera parte una anticipación.

### 3.2.3. Duración rítmica igual que un pulso (un tiempo)

En las siguientes reglas analizamos el comportamiento de notas que poseen una duración de negra. Antes de detallarlas es interesante destacar una serie de casos excepcionales a las esas reglas. Estos casos excepcionales no pueden ser definidos aisladamente para cada nota, sino como un conjunto indivisible: son las que se producen con la *cambiata*, el *Fux* y la *doble bordadura*.

La *cambiata* es una secuencia de cinco notas con la disposición interválica de segunda, tercera, y por movimiento contrario a las dos interválicas anteriores segunda y segunda. En una *cambiata* una nota se considera extraña, aún cuando la interválica sea superior

### 3.2. ETIQUETADO DE NOTAS O ANÁLISIS MELÓDICO

a una segunda. Se puede considerar de dos maneras. La decisión dependerá única y exclusivamente de la secuencia armónica.

Si las notas extrañas a la armonía son el segundo y tercer tiempo, se considera *cambiata*.

Si las notas extrañas a la armonía son el segundo y cuarto tiempo se considera *Fux*.

Tres del grupo de las cinco notas deben de ser consideradas como reales. La primera y última nota son obligatoriamente reales, la tercera nota depende de los apartados anteriores (véase Figura 3.19).

(a) *Cambiata* (b) *Fux*

(c) *Cambiata* (d) *Fux*

Figura 3.19: Notas extrañas explicadas por pertenecer a una *cambiata* o *Fux*.

La doble bordadura consta de dos notas extrañas a la armonía, que están a intervalo de segunda de la nota real. La nota real de la que se parte y a la que llega la doble bordadura tiene que ser la misma (véase Figura 3.20).

Figure 3.20 shows a musical example with a double mordent. The treble clef staff contains a melodic line with a double mordent over a note. The bass clef staff contains a harmonic rhythm of two chords. The note under the double mordent is circled in red.

Figura 3.20: Doble bordadura en un ritmo armónico de redondas.

Para que se produzca una *cambiata* o una doble bordadura, el ritmo armónico tiene que ser por compás.

## CAPÍTULO 3. ANÁLISIS TONAL

---

### 3.2.4. Primer tiempo

Reglas para notas que comienzan a tiempo:

**(RQ\_1.1)** Cuando una nota comienza en el primer tiempo de compás y posee un valor rítmico igual al pulso consideramos que es real con un nivel de confianza muy alto (NC.5).

**(RQ\_1.2)** El único caso posible de que sea extraña es una apoyatura, para este caso se tiene que dar las siguientes condiciones:

- Que la nota anterior sea la misma que la analizada (unísono).
- Que la nota siguiente sea una segunda (mayor o menor) generalmente descendente (véase Figura 3.21).

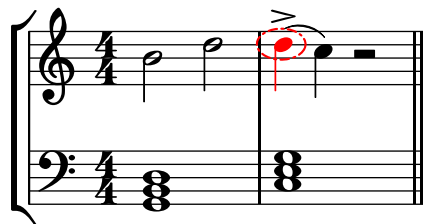


Figura 3.21: apoyatura en un ritmo armónico superior al pulso y cumpliendo las dos condiciones de la regla RQ\_1.2

**(RQ\_1.3)** Puede darse el caso de que el primer punto no se cumpla, entonces se tiene que deducir comprobando la armonía. Por lo tanto en el primer análisis melódico esto no se va a tener en cuenta. Puede que sea nota de paso en tiempo fuerte (apoyatura sin preparar) (véase Figura 3.22).

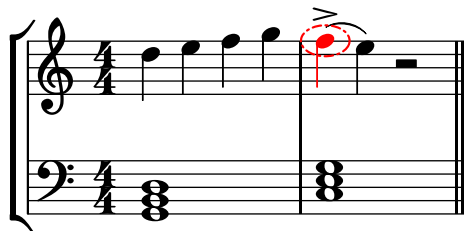


Figura 3.22: apoyatura en un ritmo armónico superior al pulso cumpliendo únicamente la segunda condición de la regla RQ\_1.2.

## 3.2. ETIQUETADO DE NOTAS O ANÁLISIS MELÓDICO

### 3.2.5. Segundo tiempo

Dividimos dos reglas similares: si el intervalo de la nota que le precede (RQ\_2.1.1) o sucede (RQ\_2.1.2) es superior a una segunda, se considera, con un nivel de confianza NC.5, nota real.

Si pertenece a una *cambiata* o en una doble bordadura siempre consideraremos que es nota extraña.

Si el intervalo que le precede o sucede es de segunda, mayor o menor, ascendente o descendente, o es un cromatismo, es el ritmo armónico el que decide si la nota es real o extraña. Por lo tanto, se considera con un nivel de confianza NC.3 o no se clasifica (véase Figura 3.23).



Figura 3.23: Nota a determinar dependiendo del ritmo armónico.

### 3.2.6. Tercer tiempo

Si el intervalo de la nota que le precede (RQ\_3.1.p) o sucede (RQ\_3.1.n) es superior a una segunda, se considera, con un nivel de confianza NC.5, nota real (véase Figura 3.24).



Figura 3.24: Nota real con un salto melódico posterior superior a una segunda.

Si el intervalo que le precede o sucede es de segunda, mayor o menor, ascendente o descendente, o es un cromatismo, el ritmo armónico es el que decide si la nota es real o extraña. Sin la armonía, se puede considerar real con un nivel de confianza NC.4, pero la seguridad nos la da el análisis armónico (véanse las figuras 3.25 y 3.26).



Figura 3.25: Nota real con un nivel de confianza NC.4. La armonía y/o el ritmo armónico determinarán el carácter de la nota.

El anterior párrafo se traduce en las reglas RQ\_3.2.1.p y RQ\_3.2.1.n para los intervalos de segunda y los intervalos anterior (*previous*) y posterior (*next*), y de forma análoga RQ\_3.2.2.p y RQ\_3.2.2.n para el cromatismo.

## CAPÍTULO 3. ANÁLISIS TONAL

---



Figura 3.26: Nota cromática.

**(RQ\_3.3.x)** El nivel de confianza para considerar la nota como real aumenta hasta el nivel 5 si los valores rítmicos que le preceden o suceden inmediatamente son inferiores a un pulso (véase Figura 3.27).

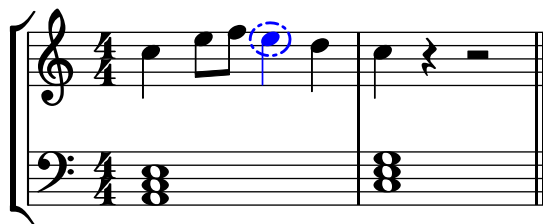


Figura 3.27: Nota real ya que el valor rítmico anterior es inferior a la nota a analizar.

Cabe la posibilidad de que sea nota de paso (véase Figura 3.28).

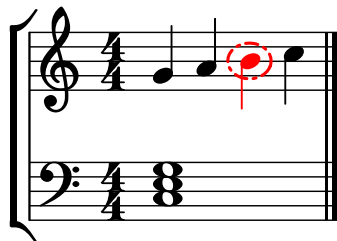


Figura 3.28: Nota de paso en un ritmo armónico superior al pulso.

**(RQ\_3.4)** Al igual que ocurre en el primer tiempo, puede darse el caso de ser una apoyatura o un retardo. Para esto tiene que cumplir con los mismos requisitos.

**(RQ\_3.5)** La nota anterior debe ser la misma que la analizada (unísono) y la nota siguiente debe ser una segunda (mayor o menor) generalmente descendente. El ritmo de la nota siguiente debe de ser también de negra.

**(RQ\_3.6)** Puede darse el caso de que la nota anterior no sea la misma que la analizada (unísono), entonces se tiene que deducir comprobando la armonía. Por lo tanto, en el primer análisis melódico esto no se va a tener en cuenta. Puede que sea nota de paso.

## 3.2. ETIQUETADO DE NOTAS O ANÁLISIS MELÓDICO

### 3.2.7. Cuarto tiempo

(RQ\_4.1) Si el intervalo de la nota que le precede o sucede es superior a una segunda, se considera, con un nivel de confianza NC.5, nota real (véase Figura 3.29).

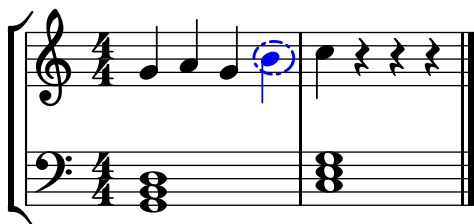


Figura 3.29: Nota real ya que el intervalo que le precede es superior a la segunda.

(RQ\_4.2) Si el intervalo que le precede o sucede es de segunda, mayor o menor, ascendente o descendente, o es un cromatismo, el ritmo armónico es el que decide si la nota es real o extraña. Sin la armonía, se puede considerar real con un nivel de confianza NC.2, pero la seguridad nos la da el análisis armónico. El nivel de confianza para considerar la nota como real aumenta al nivel 5 si el valor rítmico que le precede inmediatamente es inferior a un pulso (véase Figura 3.30).

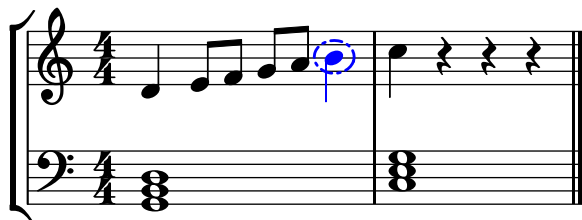


Figura 3.30: Nota real porque el ritmo anterior es inferior al ritmo de la nota que se analiza.

### 3.2.8. Nota con valor de pulso que comienzan a contratiempo

Cuando una nota se produce a contratiempo, con un valor de negra, se debe desdoblarse, por principio, en dos corcheas ligadas (véase Figura 3.31).

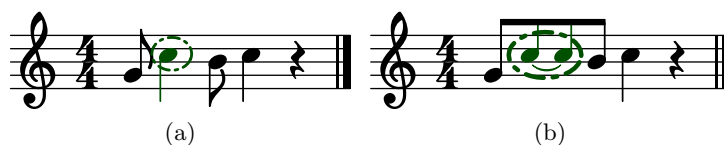


Figura 3.31: Desdoble del ritmo de negra a dos corcheas ligadas

## CAPÍTULO 3. ANÁLISIS TONAL

---

Debido a que los valores ubicados en la subdivisión del pulso son siempre más inestables que los del pulso, las reglas que se determinan para las síncopas sirven para cualquiera de los cuatro tiempos del compás. Se pueden dar varios casos de análisis:

1. Que la primera corchea sea real y la segunda sea una nota extraña (un retardo) (con NC.5). Para que se produzca este caso la interválica de la nota siguiente debe de ser de segunda ascendente o descendente (mayor o menor) (véase Figura 3.32). La armonía en este apartado es fundamental para determinar qué nota es real y cuál extraña, aunque se puede intuir, comprobando, como en el caso anterior, el salto melódico.
2. Que la primera corchea sea extraña (anticipación) y la segunda real. Es un caso bastante difícil de producirse, porque lo general es que no estén ligadas las notas (con un nivel NC.1) (véase Figura 3.33).



Figura 3.32: Desdoble del valor rítmico siendo el primer valor real y el segundo retardo.

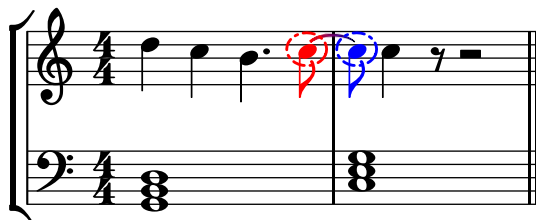


Figura 3.33: Desdoble rítmico siendo la primera corchea una anticipación y la segunda real.

### 3.2.9. Duración rítmica menor que un pulso (un tiempo)

La relación de notas que vamos a analizar van a estar subdivididas en un máximo de semicorcheas, con un pequeño análisis a las fusas.

La relación de estabilidad que poseen las notas entre sí viene reflejada por las siguientes gráficas. Los tiempos expresados en mayúsculas siempre son más estables que cualquier minúscula (Figura 3.34).

Para cualquier subdivisión, el procedimiento es el mismo. Conforme más subdividimos un tiempo, más inestable es. En una relación numérica, siendo el número 1 el más



### 3.2. ETIQUETADO DE NOTAS O ANÁLISIS MELÓDICO

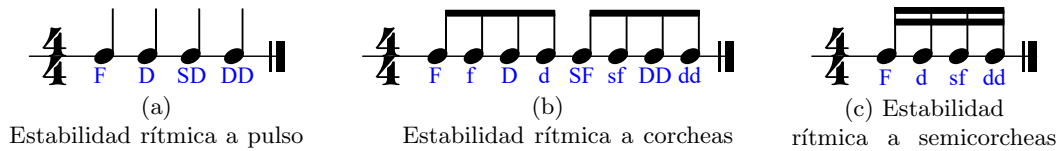


Figura 3.34: Esquemas de estabilidades rítmicas según la posición que ocupe la nota en el compás.

estable y el número 8 el más inestable, la secuencia de las corcheas anteriormente vistas quedaría como se muestra en la Figura 3.35.

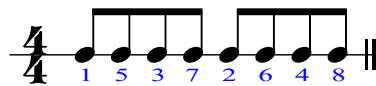


Figura 3.35: Esquema numérico de estabilidades rítmicas de cada nota con respecto a las demás notas dentro del compás, en corcheas, siendo “1” la nota más estable y “8” la nota más inestable del compás.

**(RS\_P1.1)** Si la nota siguiente es de igual o inferior valor rítmico se considera real, exceptuando el caso de la apoyatura y del retardo.

**(RS\_P1.2)** Si el intervalo siguiente a la nota analizada es superior a una segunda mayor, tanto ascendente como descendente, se considera real con un nivel de confianza NC.5.

**(RS\_P1.3)** Se puede considerar apoyatura cuando la nota anterior es la misma que la analizada, y la posterior está a distancia de segunda (mayor o menor) generalmente descendente, aunque también puede ser ascendente. Cabe la posibilidad de que la nota anterior no sea la misma que la analizada (en este caso tan sólo tenemos que fijarnos en la armonía para saber si es o no extraña) (Figura 3.36).

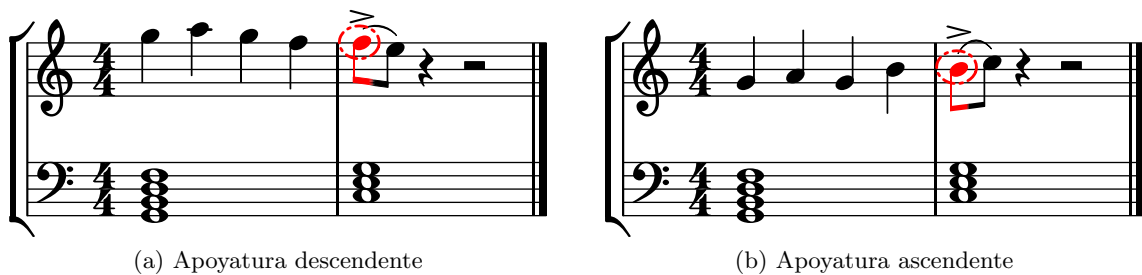


Figura 3.36: Ejemplos de apoyaturas.

## CAPÍTULO 3. ANÁLISIS TONAL

---

En el segundo y cuarto tiempo es bastante raro (NC.1) que se realicen apoyaturas o retardos.

### 3.2.10. Segunda parte del subtiempo

(RS\_P2.1) Si el valor rítmico de la nota anterior y la posterior es igual o mayor, y los intervalos son como máximo de segunda mayor, la nota puede considerarse extraña con un nivel de confianza NC.5. (Figura 3.37).

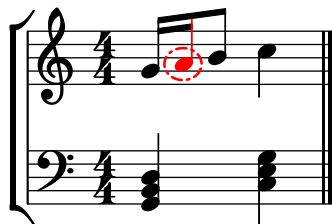


Figura 3.37: Nota de paso en la segunda semicorchea del primer tiempo ubicada dentro de un mismo entorno rítmico.

Puede considerarse extraña también, aún teniendo un valor rítmico mayor de la nota anterior y posterior si los intervalos son de segunda como máximo. Pero este caso no es muy utilizado (NC.1) (Figura 3.38).



Figura 3.38: Nota de paso en un entorno rítmico superior. NC.1.

(RS\_P2.2) Siempre que el intervalo anterior sea mayor de una segunda, la nota se considera real con un nivel NC.5 (Figura 3.39).

Está la posibilidad de que sea extraña, si se produce un movimiento de *cambiata*. Como hemos explicado en el apartado de duración rítmica igual a un pulso (Figura 3.40).

### 3.2.11. Tercera parte del subtiempo

(RS\_P3.1) Si el intervalo de la nota que le precede o sucede es superior a una segunda, se considera (con un NC.4), nota real. Aunque si la secuencia melódica es de una *cambiata*, esta nota se puede considerar extraña, para saberlo hay que basarse en la secuencia armónica (Figura 3.41).

### 3.2. ETIQUETADO DE NOTAS O ANÁLISIS MELÓDICO

---



Figura 3.39: Nota real justificada por tener un intervalo melódico anterior superior a la segunda.



Figura 3.40: La excepción de la regla se produce en una *Cambiata* o *Fux*.



Figura 3.41: Excepción de la regla siendo en este caso nota extraña por ser una *cambiata*.

Si el ritmo anterior o posterior (siempre que no pase al segundo tiempo) es inferior, se considera real con un nivel de confianza NC.5 (Figura 3.42).

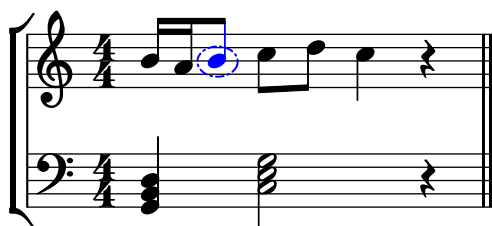


Figura 3.42: Nota real por tener un entorno rítmico inferior a la nota analizada.

#### 3.2.12. Cuarta parte del subtiempo

En la mayoría de los casos se puede considerar extraña siempre que el intervalo anterior y posterior sea como máximo de segunda. Aunque si la secuencia de intervalos

### CAPÍTULO 3. ANÁLISIS TONAL

anteriores son de segundas en el mismo sentido, esta nota puede ser real (teniéndonos que basar en la secuencia armónica para deducir si es o no real) (Figura 3.43).

(a)  
Indeterminación de la nota. Se necesita la armonía para poderla evaluar.

(b) Nota extraña. Bordadura.

(c) Nota Real.

(d) El primer “Re” analizado es una nota extraña (paso) y el segundo “Re” es nota real.

(e) Nota extraña. Es el caso más común en este entorno

Figura 3.43: Distintas opciones producidas en el cuarto subtiempo.

Si el intervalo anterior es de segunda y el anterior a éste es producido por salto, se considera extraña con un nivel de confianza NC.5 (Figura 3.44).

Figura 3.44: Nota extraña por llegar a la nota anterior a la analizada por salto y a la nota analizada por movimiento de segunda.

Si el intervalo anterior o posterior es mayor que una segunda se considera, con un nivel NC.5, como real.

## 3.2. ETIQUETADO DE NOTAS O ANÁLISIS MELÓDICO

### 3.2.13. Grupos irregulares

Para realizar un análisis melódico de un grupo irregular, debemos de basarnos en la siguiente estrategia. El tiempo tético se puede considerar, con un nivel de confianza NC.5, nota real. En las demás partes del grupo irregular, las reglas se van a establecer en base a la secuencia melódica, tal que si el intervalo anterior o posterior es superior a una segunda mayor, será, con un nivel de confianza 5, real (Figura 3.45).

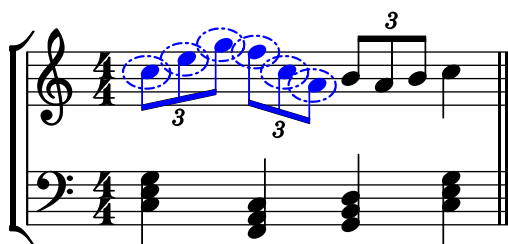


Figura 3.45: Notas reales por tener un entorno interválico melódico superior a la segunda.

En los tresillos, si la nota central posee una interválica con la anterior y posterior de segunda mayor como máximo, se considera, con un NC.5, extraña (Figura 3.46).

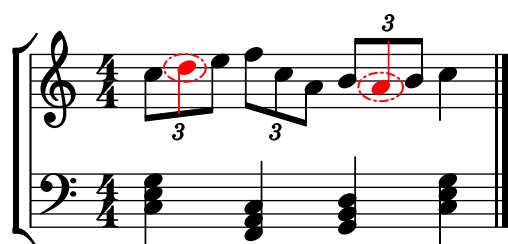


Figura 3.46: Nota extraña ubicada en el segundo subtiempo del tresillo y teniendo un entorno interválico no superior a la segunda

En relación al párrafo anterior, indicar que con el último tiempo no se puede utilizar dicha regla.

En la tercera nota, si el intervalo anterior es como máximo de segunda mayor, y el anterior a éste es superior a la segunda mayor (salto), se considera, con un nivel de confianza NC.5, extraña (Figura 3.47).

Cualquier valor rítmico superior a los demás se considera, con un nivel de confianza NC.5, nota real (Figura 3.48).

En los cinquillos y demás intervalos irregulares, las reglas se deducen análogamente a las expuestas en el tresillo.

### 3.2.14. Equivalencias para el resto de compases

Para el caso de un compás ternario ( $\frac{3}{4}$ ), se considera equivalente al efecto de las reglas expuestas en el análisis de la melodía según las relaciones expuestas en la siguiente tabla:

## CAPÍTULO 3. ANÁLISIS TONAL

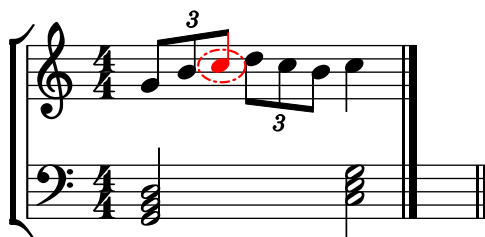


Figura 3.47: Nota extraña porque el intervalo anterior es de segunda y el anterior al anterior es por salto

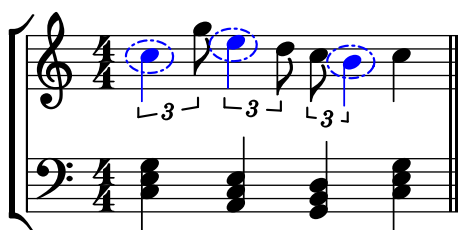


Figura 3.48: Notas reales deducidas por estar ubicadas en un entorno rítmico inferior a la nota analizada.

Compás de $\frac{3}{4}$	Compás de $\frac{4}{4}$
primer tiempo	primer tiempo
segundo tiempo	segundo tiempo
tercer tiempo	cuarto tiempo

Y para el caso de un compás binario ( $\frac{2}{4}$ ), se considera equivalente al efecto de las reglas expuestas en el análisis de la melodía según las relaciones expuestas en la siguiente tabla:

Compás de $\frac{2}{4}$	Compás de $\frac{4}{4}$
primer tiempo	primer tiempo
segundo tiempo	tercero tiempo

Para el caso de compases irregulares y compuestos, se analizan según las reglas de los compases simples, bien con subdivisión binaria o ternaria, utilizando las reglas de los compases cuaternario, ternario y binario, con subdivisión regular o con las reglas de los grupos irregulares.

### 3.2.15. Implementación del sistema de reglas de análisis melódico

Algunas de las reglas anteriormente detalladas no son implementables si no disponemos de información armónica subyacente. En otros casos, las reglas requieren la alteración de la partitura original, como es el caso del desdoble de una blanca en dos negras ligadas. En la tabla 3.1 se muestra el conjunto de reglas que aplicaremos en el

### 3.2. ETIQUETADO DE NOTAS O ANÁLISIS MELÓDICO

sistema. Se puede comprobar también que algunas de las reglas anteriormente detalladas se han desdoblado en varias para facilitar la depuración del mismo.

Por otra parte, y con el objetivo de simplificar la conexión del análisis melódico con los otros sistemas, hemos reducido los niveles de confianza de los cinco expuestos en la página 77 a tres:

- **l (low)** : nivel de confianza muy bajo y bajo (NC1 y NC2).
- **m (medium)** : nivel de confianza medio (NC3)
- **h (high)** : nivel de confianza alto y muy alto (NC4 y NC5).

Regla	Condición	Etiqueta	Confianza	Tipo NH <sup>2</sup>
RL1.1	$beat = 1 \wedge \neg subbeat \wedge rd > 1$	HT	h	
RL1.2	$beat = 1 \wedge \neg subbeat \wedge rd > 1 \wedge nextI \in \{-2,01, -2,02\} \wedge prevI = 1,00 \wedge rd_n \geq 1$	NHT	m	apoyatura
RL1.3	$beat = 1 \wedge \neg subbeat \wedge rd > 1 \wedge nextI \in \{-2,01, -2,02\} \wedge prevI \in \{-2,01, -2,02, +2,01, +2,02\} \wedge rd_n \geq 1$	NHT	m	apoyatura
RL1.2.1	$beat = 1 \wedge \neg subbeat \wedge rd > 1 \wedge nextI \in \{+2,01, +2,02\} \wedge prevI = 1,00 \wedge rd_n \geq 1$	NHT	l	apoyatura
RL1.5	$beat = 1 \wedge \neg subbeat \wedge rd > 4$	HT	s	
RL2.2	$beat = 2 \wedge \neg subbeat \wedge rd > 1 \wedge prevI \in \{-2,01, -2,02, +2,01, +2,02\} \wedge nextI \in \{-2,01, -2,02, +2,01, +2,02\}$	NHT	l	Nota de paso o bordadura
RL2.4	$beat = 2 \wedge \neg subbeat \wedge rd > 1 \wedge prevI > 2.s \wedge nextI > 2.s$	HT	s	
RL3.1	$beat = 3 \wedge \neg subbeat \wedge rd > 1$	HT	h	
RL3.2	$beat = 3 \wedge \neg subbeat \wedge rd = 2 \wedge rd > rd_n$	HT	h	
RL3.3	$beat = 3 \wedge \neg subbeat \wedge rd > 1 \wedge rd > rd_n \wedge prevI > 2.s$	HT	h	
RL4.1	$beat = 4 \wedge \neg subbeat \wedge rd > 1$	HT	h	
RQ1.1	$beat = 1 \wedge \neg subbeat \wedge rd = 1$	HT	h	
RQ1.2	$beat = 1 \wedge \neg subbeat \wedge rd = 1 \wedge prevI = 1,00 \wedge nextI \in \{-2,01, -2,02, +2,01, +2,02\}$	NHT	m	apoyatura
RQ1.3	$beat = 1 \wedge \neg subbeat \wedge rd = 1 \wedge prevI \in \{-2,01, -2,02, +2,01, +2,02\} \wedge nextI \in \{-2,01, -2,02, +2,01, +2,02\}$	NHT	l	Nota de paso en tiempo fuerte o apoyatura no preparada
RQ2.1.1	$beat = 2 \wedge \neg subbeat \wedge rd = 1 \wedge prevI > 2.s$	HT	h	
RQ2.1.1	$beat = 2 \wedge \neg subbeat \wedge rd = 1 \wedge nextI > 2.s$	HT	h	
RQ3.1.p	$beat >= 3 \wedge \neg subbeat \wedge rd = 1 \wedge prevI > 2.s$	HT	h	

<sup>2</sup>Hace referencia al tipo de nota extraña (no armónica) que se atribuirá a la nota analizada si se cumple la condición. La celda de esta columna quedará en blanco si la condición es para clasificar la nota como real (armónica).

## CAPÍTULO 3. ANÁLISIS TONAL

RQ3.1.n	$beat \geq 3 \wedge \neg subbeat \wedge rd = 1 \wedge nextI > 2.s$	HT	h	
RQ3.1.1.p1	$beat \geq 3 \wedge \neg subbeat \wedge rd = 1 \wedge prevI \in \{-2,01, -2,02, +2,01, +2,02\} \wedge rd_p < 1$	HT	h	
RQ3.1.1.p2	$beat \geq 3 \wedge \neg subbeat \wedge rd = 1 \wedge prevI \in \{-2,01, -2,02, +2,01, +2,02\} \wedge rd_p \geq 1$	HT	m	
RQ3.1.1.n1	$beat \geq 3 \wedge \neg subbeat \wedge rd = 1 \wedge nextI \in \{-2,01, -2,02, +2,01, +2,02\} \wedge rd_n < 1$	HT	h	
RQ3.1.1.n2	$beat \geq 3 \wedge \neg subbeat \wedge rd = 1 \wedge nextI \in \{-2,01, -2,02, +2,01, +2,02\} \wedge rd_n \geq 1$	HT	m	
RQ3.1.2.p1	$beat \geq 3 \wedge \neg subbeat \wedge rd = 1 \wedge prevI \in \{-1,01, +1,01\} \wedge rd_p < 1$	HT	h	
RQ3.1.2.p2	$beat \geq 3 \wedge \neg subbeat \wedge rd = 1 \wedge prevI \in \{-1,01, +1,01\} \wedge rd_p \geq 1$	HT	m	
RQ3.1.2.n1	$beat \geq 3 \wedge \neg subbeat \wedge rd = 1 \wedge nextI \in \{-1,01, +1,01\} \wedge rd_n < 1$	HT	h	
RQ3.1.2.n2	$beat \geq 3 \wedge \neg subbeat \wedge rd = 1 \wedge nextI \in \{-1,01, +1,01\} \wedge rd_n \geq 1$	HT	m	
RQ3.4	$beat = 3 \wedge \neg subbeat \wedge rd = 1 \wedge prevI = 1,00 \wedge nextI \in \{-2,01, -2,02\} \wedge rd_n = 1$	NHT	m	apoyatura
RQ3.5	$beat = 3 \wedge \neg subbeat \wedge rd = 1 \wedge prevI = 1,00 \wedge nextI \in \{-2,01, -2,02\} \wedge rd_n = 1$	NHT	l	apoyatura
RQ3.6	$beat = 3 \wedge \neg subbeat \wedge rd = 1 \wedge prevI \in \{-2,01, -2,02, +2,01, +2,02\} \wedge nextI \in \{-2,01, -2,02, +2,01, +2,02\}$	NHT	l	nota de paso
RQ4.1.p	$beat = 4 \wedge \neg subbeat \wedge rd = 1 \wedge prevI > 2.s$	HT	h	
RS_T	$\neg subbeat \wedge rd < 1$	HT	m	
RS_NT	$subbeat \wedge rd < 1$	NHT	m	
RS_P1.1	$rd < 1 \wedge part = 2rd \geq rd_n$	HT	m	
RS_P1.2	$rd < 1 \wedge part = 2 \wedge nextI > 2.s$	HT	h	
RS_P1.3s	$(beat = 1 \vee beat = 3) \wedge rd < 1 \wedge part = 2 \wedge prevI = 1,00 \wedge nextI \in \{-2,01, -2,02, +2,01, +2,02\}$	NHT	h	apoyatura
RS_P1.3w	$(beat = 2 \vee beat = 4) \wedge rd < 1 \wedge part = 2 \wedge prevI = 1,00 \wedge nextI \in \{-2,01, -2,02, +2,01, +2,02\}$	NHT	m	apoyatura
RS_P2.1	$rd < 1 \wedge part = 3 \wedge (1,0 \leq prevI \leq 2,0) \wedge (1,0 \leq nextI \leq 2,0) \wedge (rd_p \leq rd \leq rd_p)$	NHT	h	
RS_P2.2	$rd < 1 \wedge part = 3 \wedge prevI > 2.s$	HT	h	
RS_P3.1p	$rd < 1 \wedge part = 4 \wedge prevI > 2.s$	HT	h	
RS_P3.1n	$rd < 1 \wedge part = 4 \wedge nextI > 2.s$	HT	h	

### 3.3 Obtención de la Tonalidad

Disponemos de dos formas de analizar la tonalidad en el sistema. La primera (sección 3.3.1) está diseñada para trabajar aisladamente, sin la concurrencia de los



### 3.3. OBTENCIÓN DE LA TONALIDAD

---

sistemas que analizan otros aspectos de la obra. La segunda (sección 3.3.2) lo está para ser integrada con el sistema completo de análisis melódico y acórdico.

#### 3.3.1. Detección aislada de la tonalidad

Si la obra está al completo, con mirar la última nota o el último acorde, se puede deducir, casi con total seguridad, la tonalidad.

#### Monódicas

Para establecer la tonalidad que posee una melodía dada, trabajando con melodías monódicas, vamos a utilizar dos procedimientos.

**Primer procedimiento:** Se va a realizar un recuento de todas las notas que compongan la melodía. Al final se obtendrá una serie de notas con un grado de participación en la melodía. Se cogerán las siete notas que mayor puntuación hayan obtenido, ordenándolas en escala ascendente. Esta escala se comprobará con la interválica de los dos modos que existen en la época clásica. Si la escala no coincidiera con ninguno de los dos modos, se avanzaría un puesto, volviendo a comprobar la secuencia con los dos modos. Así hasta encontrar el modo y tono de la melodía.

**Segundo procedimiento:** Se pueden también detectar las alteraciones que aparecen con mayor frecuencia y, basándose en estas alteraciones, determinar la tonalidad de la melodía. Aunque los modos mayor y menor compartan alteraciones, el modo menor tendrá también la alteración de la sensible, distinguiendo ésta del modo mayor. La tabla quedaría determinada de la siguiente manera (tabla 3.2):

Las notas enmarcadas entre corchetes [·] indican notas que, como máximo, aparecen una vez al final de la partitura. Son notas que reciben el nombre de “la tercera picarda” y que se colocan en el acorde de tónica al final de la obra, dándole un cambio de color. Además a cada tonalidad se le añade el acorde de Napolitano. El Napolitano (de la Motte, 1994, 1995) se realiza rebajando el segundo grado de una tonalidad, convirtiendo este acorde menor (en las tonalidades mayores) o disminuido (en las tonalidades menores) en un acorde perfecto mayor, rebajando el segundo y sexto grado de la escala en las tonalidades mayores y solamente el segundo grado en las tonalidades menores. Por lo general, este acorde se utiliza en las tonalidades menores teniendo, por el contrario, muy poco uso en las tonalidades mayores ya que mientras que en las tonalidades menores sólo se rebaja el segundo grado, en las tonalidades mayores se tiene que rebajar el segundo y sexto grado. De esta manera se recrea una praxis musical modal haciendo referencia a las reminiscencias del modo *deuterus* (frigio).

En el Renacimiento, la forma de “cadenciar” se realizaba mediante cláusulas, éstas se establecían principalmente de dos maneras, alcanzando la nota *finalis* y/o la cuerda de recitación (nuestra dominante) mediante la semitonía del modo utilizado, denominándose cláusula remisa, o llegando a dichas notas mediante semitonos, las denominadas cláusulas sostenidas. En estas últimas cláusulas (las sostenidas) se podían formar acordes alterados,

### CAPÍTULO 3. ANÁLISIS TONAL

Cuadro 3.2: Cuadro de obtención de la tonalidad a partir de las notas alteradas.

Notas alteradas	Tono mayor	Tono menor	Posibles alteraciones
Ninguna	Do mayor		
Sol $\sharp$		La menor	Fa $\sharp$ , Sol, [Do $\sharp$ ]
Fa $\sharp$	Sol mayor		
Fa $\sharp$ , Re $\sharp$		Mi menor	Do $\sharp$ , Re, [Sol $\sharp$ ]
Fa $\sharp$ , Do $\sharp$	Re mayor		
Fa $\sharp$ , Do $\sharp$ , La $\sharp$		Si menor	Sol $\sharp$ , La, [Re $\sharp$ ]
Fa $\sharp$ , Do $\sharp$ , Sol $\sharp$	La mayor		
Fa $\sharp$ , Do $\sharp$ , Sol $\sharp$ , Mi $\sharp$		Fa $\sharp$ menor	Re $\sharp$ , Mi, [La $\sharp$ ]
Fa $\sharp$ , Do $\sharp$ , Sol $\sharp$ , Re $\sharp$	Mi mayor		
Fa $\sharp$ , Do $\sharp$ , Sol $\sharp$ , Re $\sharp$ , Si $\sharp$		Do $\sharp$ menor	La $\sharp$ , Si, [Mi $\sharp$ ]
Fa $\sharp$ , Do $\sharp$ , Sol $\sharp$ , Re $\sharp$ , La $\sharp$ (Sib, Mib, Lab, Reb, Solb, Dob, Fab)	Si mayor (Dob mayor)		
Do $\sharp$ , Sol $\sharp$ , Re $\sharp$ , La $\sharp$ , Fax (Sib, Mib, Lab, Reb, Dob, Fab)		Sol $\sharp$ menor (Lab menor)	Mi $\sharp$ , Fa $\sharp$ , [Si $\sharp$ ] (Fa), (Solb)
Fa $\sharp$ , Do $\sharp$ , Sol $\sharp$ , Re $\sharp$ , La $\sharp$ , Mi $\sharp$ (Sib, Mib, Lab, Reb, Solb, Dob)	Fa $\sharp$ mayor (Solb mayor)		
Fa $\sharp$ , Sol $\sharp$ , Re $\sharp$ , La $\sharp$ , Mi $\sharp$ , Dox (Sib, Mib, Lab, Solb, Dob)		Re $\sharp$ menor (Mib menor)	Si $\sharp$ , Do $\sharp$ , [Fax] (Do), (Reb), [Sol]
Fa $\sharp$ , Do $\sharp$ , Sol $\sharp$ , Re $\sharp$ , La $\sharp$ , Mi $\sharp$ , Si $\sharp$ (Sib, Mib, Lab, Reb, Solb)	Do $\sharp$ mayor Reb mayor		
Fa $\sharp$ , Do $\sharp$ , Re $\sharp$ , La $\sharp$ , Mi $\sharp$ , Si $\sharp$ , Solx (Sib, Mib, Reb, Solb)		La $\sharp$ menor Sib menor	Fax, Sol $\sharp$ , [Dox] Lab, Sol, [Re]
Sib	Fa mayor		
Do $\sharp$		Re menor	Sib, Do, [Fa $\sharp$ ]
Sib, Mib	Sib mayor		
Sib, Fa $\sharp$		Sol menor	Mib, Fa, [Si]
Sib, Mib, Lab	Mib mayor		
Mib		Do menor	Lab, Sib, [Mi]
Sib, Mib, Lab, Reb	Lab mayor		
Sib, Lab		Fa menor	Reb, Mib, [La]

que según Bukofzer (1986) son los precursores de los acordes de sextas aumentadas. Ya que esta praxis musical dejó de utilizarse en la época barroca, en este trabajo no se han desarrollado los acordes alterados, principalmente los de sexta aumentada, aunque es totalmente factible el implementarlo para su uso al adaptar el sistema a otra época.

El problema a solucionar con este sistema es el reconocimiento de las dobles alteraciones.

Analizada y establecida una secuencia de notas diatónicas, se establece una tonalidad general para la obra. Posteriormente se vuelve a realizar otro análisis sustrayendo las notas cromáticas que no concuerdan con las diatónicas de la tonalidad.

A modo particular, para aquellas notas que no sean reconocidas dentro de la tonalidad debido a la alteración de dicha nota o notas, se vuelve a realizar un análisis tonal que

---

### 3.3. OBTENCIÓN DE LA TONALIDAD

---

nos determina las posibles tonalidades que puede haber según la o las notas alteradas. Este apartado, este análisis se realizará después de determinar los posibles acordes.

#### Polifónicas

Una vez ejecutada la detección de notas importantes (con el análisis melódico), en todas las voces se establecen verticalmente unos acordes (ver apartados siguientes). Con todos los acordes especificados, se establecen tres apartados de búsqueda:

1. Se busca entre los acordes hallados el de séptima de dominante (acorde perfecto mayor con séptima menor). Una vez hallado, se determina la nota que va a ser la tónica de la tonalidad, bien con el intervalo de quinta justa descendente o bien con el intervalo de cuarta justa ascendente. Con este proceso averiguamos el tono de la obra. El siguiente paso nos determinará el modo de la obra. Para ello, volvemos a buscar en los acordes encontrados todos aquellos que comiencen por la nota determinada anteriormente como tónica y analizamos aquellos acordes que resulten: si los acordes encontrados son perfectos mayores, entonces la tonalidad será mayor, y análogamente, si los acordes de tónica encontrados son principalmente menores, la tonalidad será menor.
2. Se busca entre los acordes hallados el de séptima de sensible (acorde disminuido con séptima menor). Hallado éste, se determina la tónica subiendo un intervalo de segunda menor ascendente. La nota localizada nos determina el tono de la obra, y el modo será en este caso siempre mayor. El modo se ratifica comprobando la mediante de la tonalidad.
3. Se busca entre los acordes hallados el de séptima disminuida (acorde disminuido con séptima disminuida). Hallado éste, se determina la tónica subiendo un intervalo de segunda menor ascendente. La nota localizada nos determina el tono de la obra, y el modo será en este caso siempre menor. El modo se ratifica comprobando la mediante de la tonalidad: si el intervalo entre la fundamental y la mediante es de tercera mayor, la tonalidad será mayor, y en el caso de que sea menor, la tonalidad será menor.

En los apartados dos y tres, se deben de determinar los acordes obligatoriamente con la séptima, ya que en los modos menores, el segundo grado también es un acorde disminuido, siendo el acorde disminuido de cuatríada (con la séptima) el que nos determine exactamente que se trata de un séptimo grado tonal (y no de un segundo grado).

Cuando la obtención de la tonalidad se establezca según los apartados 2. y 3. anteriores, también se puede ratificar el modo comprobando la mediante de la tonalidad. Si la relación entre la tónica y la mediante es una tercera mayor, la tonalidad será mayor y viceversa: si la relación es menor, la tonalidad será menor.

### 3.3.2. Análisis de alteraciones para la detección de la tonalidad

El análisis de alteraciones filtra, de las 24 posibles tonalidades, aquellas que no son viables dadas las alteraciones del conjunto de notas. Este filtrado se realiza para cada una de las ventanas. Las siguientes definiciones nos describen como se utiliza esta sección del análisis.

**Definición 3.3.1**  $mode(k) \in \{Maj, min\}$

Describe el modo de la tonalidad. Cada tonalidad posee dos modos: el modo mayor y el modo menor.

**Definición 3.3.2**  $expectedSem(g, m)$

Los valores de esta función están detallados en la Tabla 3.3 como el conjunto interválico de semitonos válidos desde el primer grado de la escala hasta el grado  $g$  especificado, según el modo  $m$  de una tonalidad. Además de la secuencia interválica expresada según el modo, se determina que el II grado puede estar a una segunda menor de la Tónica, incluyendo de esta manera el Napolitano. También incluimos para las tonalidades menores el III grado mayor al final de la obra para dar la posibilidad de utilizar la tercera picarda.

**Definición 3.3.3**  $actualSem(n_i, k)$

Este valor corresponde al número actual de semitonos desde la tónica de  $k$  a  $n_i$

**Definición 3.3.4**  $deg(n_i, k)$

Se define como el grado de una nota  $n_i$  dada una tonalidad  $k$ .

**Definición 3.3.5**  $isDiatonic(n_i, k)$

Esta función booleana se calcula mediante

$$actualSem(n_i, k) \in expectedSem(deg(n_i, k), mode(k))$$

Introducimos aquí el conjunto  $K_w$  de todas las tonalidades válidas para el conjunto de notas en una determinada ventana,  $S_w$ . Una tonalidad  $k \in K_w$  si  $isDiatonic(n_i, k)$  es cierto  $\forall n_i \in S_w$ .

Cuadro 3.3: Escalas diatónicas para la Definición 3.3.2. En el cuadro se representan todos los semitonos válidos desde la tónica. el valor (1) hace referencia al Napolitano y el valor (4) representa la tercera de Picardía, al final de la obra.

<i>expectedSem</i>	I	II	III	IV	V	VI	VII
<i>Maj</i>	0	2,(1)	4	5	7	9	11
<i>min</i>	0	2,(1)	3,(4)	5	7	9,8	11,10

### 3.4 Análisis acórdico

En este trabajo se va a realizar un análisis de acordes y funcional. El análisis acórdico nos va a indicar el grado del acorde dentro de una tonalidad basándonos en una escala diatónica. Por lo tanto, se van a identificar un total de siete acordes pertenecientes a una misma tonalidad.

El análisis funcional va a determinar la función del acorde dentro de la tonalidad. Estableciendo tres funciones tonales, los siete acordes identificados dentro de la tonalidad, estarán distribuidos en dichas funciones tonales.

Los acordes se van a establecer en base a una tonalidad, la cual se ha establecido en el apartado anterior, teniendo en cuenta solamente las notas que hayan sido analizadas como notas reales en el análisis melódico descrito en la Sección 3.2.15.

En una primera implementación se intentó detectar el acorde reordenando las notas por sucesión de terceras, pero nos encontramos el problema de los acordes incompletos (aquellos acordes que les falta o bien la tercera o bien la quinta nota), donde el sistema nos devolvía las primeras notas del acorde y no incluía las notas siguientes a la que le faltaba. Por ejemplo, en el acorde de séptima de dominante, si este estaba incompleto (sin la quinta del acorde) el sistema nos devolvía solamente las dos primeras notas (fundamental y tercera) pero no nos detectaba la séptima del acorde. Esto implica que para un acorde de cuatríada (formado por cuatro notas distintas) el sistema solo devolvía un acorde formado por dos notas (Figura 3.49).

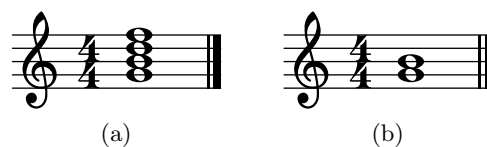


Figura 3.49: Reducción obtenida por el sistema de un acorde de cuatríada a un acorde diada.

El problema se ha solucionado reorganizando el acorde en sucesión de terceras o de quintas. De tal forma que de una fundamental se comprueba la tercera y la quinta, y de la tercera del acorde se comprueba su quinta (séptima del acorde).

## CAPÍTULO 3. ANÁLISIS TONAL

---

### 3.4.1. Funciones Tonales

Entendemos que la música está basada en un continuo vaivén de tensiones y distensiones, de estabilidad e inestabilidad, de la cual fluyen todos los elementos musicales. En la música tonal, el hecho progresivo de añadirle disonancias a los acordes con función tonal de dominante, indica el propósito de generar tensiones, inestabilidades que se resuelven en sucesivos acordes, los cuales no poseen disonancias (acordes con función de tónica). En el trayecto de ir de la estabilidad a la inestabilidad musical se incluye una función transitoria denominada función de subdominante. Aunque hemos tenido la oportunidad de denominar dichas funciones con otros nombres, en principio, hemos mantenido los nombres de las funciones tonales clásicas, por que definen muy bien la secuencia de transición de la estabilidad a la inestabilidad. Para nosotros, todas las notas, todos los acordes, toda la música en sí, cumple este principio.

Desde este punto de vista, se establece una relación de funciones tonales basadas en las comentadas tensiones y distensiones.

Los siete acordes establecidos en una tonalidad se van a distribuir en tres funciones tonales. Ciertos grados sólo poseen una función tonal mientras que otros dispondrán de varias funciones tonales. La relación entre acorde y función tonal vendrá establecida por el entorno armónico-musical en el que se establece el acorde a analizar. La relación acorde y función tonal queda establecida según el Cuadro 3.4.

Cuadro 3.4: Funciones tonales de los acordes.

Acorde	Función tonal
I	Tónica
II	Subdominante
III	Dominante, Subdominante, Tónica
IV	Subdominante
V	Dominante
VI	Subdominante, Tónica
VII	Dominante, Subdominante (siendo subtónica en tonos menores)

Para los acordes de Tónica (I), supertónica (II), subdominante (IV), dominante (V) y sensible (VII) sólo se establece una relación de función tonal, resultando la medianta (III) y la superdominante (VI) con varias posibilidades de asumir diversas funciones tonales. La obtención de una u otra función tonal dependerá del entorno armónico. Este entorno se establece según los siguientes criterios.

**Para el acorde de medianta (III):** Este acorde es el acorde que más pluralidad obtiene en funciones tonales dentro de una misma tonalidad. Según el modo de la tonalidad, el acorde podrá poseer una función tonal u otra. Se va a establecer el criterio de relación funcional con el acorde de medianta según el modo de la tonalidad en la que nos encontremos.

**Para una modalidad mayor.** El acorde de Mediante en una tonalidad mayor es un acorde perfecto menor, en donde la quinta del acorde es la sensible de la tonalidad. Si el acorde se encuentra completo (con la quinta) la función tonal será, con un nivel de confianza NC.5, de Dominante.

Para ello el acorde deberá de resolverse en un acorde con función de Tónica: III → I o III → VI.

Si el acorde se encuentra incompleto (sin la quinta), siendo un acorde de triada, entonces debemos de mirar el entorno musical. Si el acorde que viene antes es un acorde con función de Dominante, entonces el acorde de Mediante posee una función, con un nivel NC.5, de Tónica.

Además de la función de dominante y de tónica, el tercer grado, puede adquirir la función de subdominante. Somos conscientes de que en ningún tratado musical se le atribuye al tercer grado la función de subdominante, no obstante, se le atribuye esta función porque se considera las funciones tonales como grados de tensión y de estabilidad musical. Desde este punto de vista, y considerando tres grados de tensiones, cuando el tercer grado está ubicado entre una función de tónica y otra de dominante, es lógico atribuirle una función transitoria entre dichas dos funciones. La función transitoria es la de subdominante. Por otro lado, se considera oportuno atribuirle otra función transitoria o subordinada, única y exclusivamente para este caso en particular.

**Para el acorde de subdominante (VI):** Como se ha comentado anteriormente, el acorde de subdominante posee dos funciones tonales dependiendo del entorno armónico. Para que el sexto grado tenga una función de subdominante la función del acorde anterior debe de ser de tónica o de subdominante, siendo indiferente la función armónica que le suceda. Para que su función sea de tónica, el acorde que le preceder debe de tener una función de dominante.

Con todo esto, el grado del acorde resultante se extrae usando la función  $g$  definida a continuación en 3.4.1.

### Definiciones

**Definición 3.4.1**  $g_{c_i,k} = \text{deg}(\text{root}(c_i), k)$

El grado de un acorde  $c_i$  en una tonalidad  $k$  es igual al grado de la nota fundamental ( $\text{root}$ ) de dicho acorde.

**Definición 3.4.2**  $f_{c_i,k} = \begin{cases} \{T\} & \text{si } g_{c_i,k} = \text{I} \\ \{SD\} & \text{si } g_{c_i,k} = \text{II} \\ \{T, SD, D\} & \text{si } g_{c_i,k} = \text{III} \\ \{SD\} & \text{si } g_{c_i,k} = \text{IV} \\ \{D\} & \text{si } g_{c_i,k} = \text{V} \\ \{SD, T\} & \text{si } g_{c_i,k} = \text{VI} \\ \{D, SD\} & \text{si } g_{c_i,k} = \text{VII} \end{cases}$

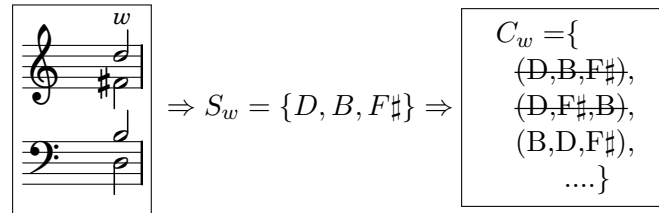


Figura 3.50: Ejemplo de extracción de un acorde. A partir de las notas en la ventana (izquierda), se construye el conjunto de nombres de notas (centro) y se calculan todas las combinaciones (derecha) filtrando aquellas que no cumplen la condición (3.1) (combinaciones tachadas).

### 3.5 Grafo para la obtención del mejor análisis posible

Para cada uno de los compases, se selecciona la duración de la figura rítmica de menor valor como la resolución de este compás. Después, el compás se divide en ventanas de esa duración para todas las voces. De esa forma, la pieza musical se trocea en una secuencia  $W$  de ventanas. Para cada ventana  $w \in W$ , se construye el conjunto  $S_w$  de todas las notas que suenen en él y se crea otro conjunto  $C_w$  de los acordes con todas las combinaciones de notas en  $S_w$ .

Dos notas adyacentes de un acorde  $c_i \in C_w$  deben cumplir la condición (3.1):

$$\forall \text{note}_{j-1}, \text{note}_j \in c_i, \quad \text{pitchInterval}(\text{note}_{j-1}, \text{note}_j) \in \{3.s, 5.s\} \quad (3.1)$$

Un esquema de *backtracking* calcula todas las posibles combinaciones de nombres de nota sin octava en  $S_w$  descartando aquellas ordenaciones que contengan notas adyacentes incumpliendo dicha condición. El resultado del *backtracking* deja en  $C_w$  el conjunto de acordes válidos. Véase un ejemplo en la Figura 3.50.

Nótese que el proceso de *backtracking* reordena todas las notas del acorde. Esto significa que, incluso si las posiciones originales de las notas sugieren una inversión, este proceso la borra y devuelve la nota fundamental del acorde a la posición de la nota más abajo.

Para cada ventana temporal  $w \in W$  construimos un conjunto de tonalidades válidas  $K_w$  usando los principios expuestos en la sección 3.3.2. Usando los acordes  $C_w$  y las tonalidades  $K_w$ , siguiendo los principios expuestos en 3.4.1, se calcula el conjunto  $F_{w,k}(c_i)$  de todas las funciones tonales viables ( $f$ ) para todos los  $k \in K_w$  y todos los  $c_i \in C_w$ .

A continuación, se construye un grafo dirigido acíclico ponderado (wDAG) usando esos datos.

#### Construcción del grafo

Definimos el wDAG como una tupla  $G = (V, E, D)$ , donde  $V$  es el conjunto de nodos y cada  $v \in V$  se etiqueta con los valores proporcionados por  $F_{w,k}(c_i)$ . Así, usaremos las



### 3.5. GRAFO PARA LA OBTENCIÓN DEL MEJOR ANÁLISIS POSIBLE

etiquetas (funciones tonales)  $f$  para representar los nodos, en lugar de  $v$ .  $E \subseteq V \times V$  es el conjunto de aristas, y  $D$  el conjunto de pesos que se computan mediante una función de ponderación  $d : E \rightarrow \mathbb{R}$ . Los vértices se particionan en  $|W|$  conjuntos disjuntos  $V_i$ ,  $1 \leq i \leq |W|$ , de forma que, si  $(f_a, f_b) \in E$ , entonces  $f_a \in V_i$  y  $f_b \in V_{i+1}$ . Cada subconjunto  $V_i$  incluye los nodos desde una ventana  $w$  dada. De esta forma, el grafo se estructura como una secuencia de capas,  $V_i$ , representado el transcurso del tiempo a lo largo de la partitura. La definición de la función de ponderación se define más abajo en la sección de cadencias (3.5.1).

The figure shows a musical score for a single measure in 4/4 time, divided into five staves: Soprano (S), Alto (A), Tenor (T), Bass (B), and Analysis. The Analysis staff shows the chord progression and figured bass for each beat. The chords are: V (GM), III (CM), IV (CM), IV (CM), V (GM), V (GM), III (CM), V (GM), I (CM), I (CM), I (CM), I (CM), I (CM), I (CM), V (GM), V (GM). The figured bass is: 76 GM, 77 CM, 78 CM, 79 CM, 80 GM, 81 GM, 82 CM, 83 GM, 84 CM, 85 CM, 86 CM, 87 CM, 88 CM, 89 CM, 90 GM, 91 CM. The tonalities are indicated by the letters GM and CM.

Figura 3.51: Salida del análisis para un compás. La primera fila bajo del pentagrama “Analysis” muestra el grado tonal, la segunda fila nos indica la función tonal, los números en la tercera fila indican el número de ventana y la tonalidad se muestra en la cuarta.

La Figura 3.52 muestra un extracto del grafo para el décimo compás de la coral #25 de Bach (correspondiente a la partitura en la Figura 3.51). Se ha incluido el análisis completo en el anexo A.

### CAPÍTULO 3. ANÁLISIS TONAL

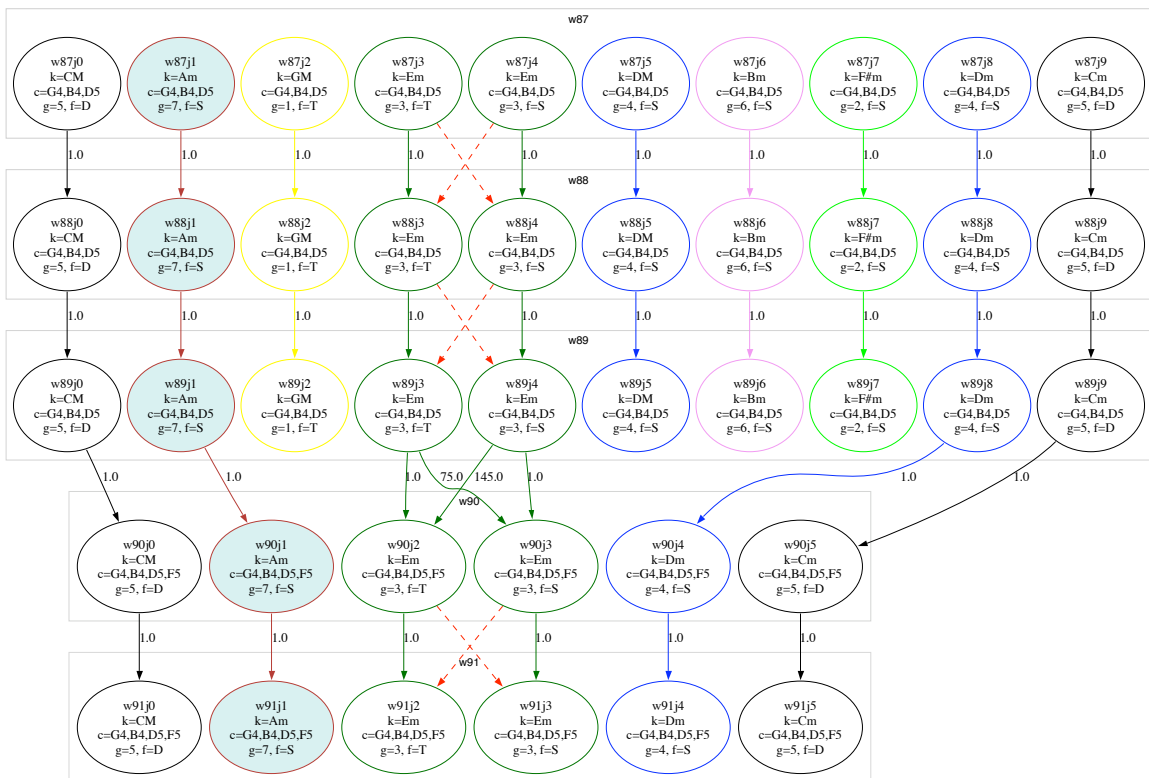


Figura 3.52: Ejemplo de grafo. Las aristas con peso 0 y aquellas que implican un cambio de tonalidad no se muestran por claridad. Las aristas con un valor  $-\infty$  se muestran como líneas discontinuas.

## 3.5. GRAFO PARA LA OBTENCIÓN DEL MEJOR ANÁLISIS POSIBLE

### 3.5.1. Cadencias: pesos del grafo

Las cadencias son puntos de reposos musicales, además tienen la función de reafirmar la tonalidad. Teniendo tres funciones tonales, una cadencia se produce cuando se concluye con la función de tónica. Dependiendo de la función tonal que tenga anteriormente dicha tónica, se producirá una cadencia perfecta, imperfecta o rota, si antecede una función de dominante, o una cadencia plagal, si la función que antecede es de subdominante. Cuando no se termina en la función de tónica se le atribuye una semicadencia. Al tener dos funciones tonales restantes, se podrá realizar dos semicadencias: semicadencia a la subdominante si realiza sobre una función de subdominante (II, IV, VI) o semicadencia a la dominante realizándolo sobre una función de dominante (V, VII).

El Cuadro 3.5 indica las distintas cadencias.

Cuadro 3.5: Cadencias.

Cadencia	Funciones tonales	Grados
Perfecta	D-T	V-I; V-i;
Imperfecta	D-T	vii-I; vii-i
Rota	D-T	V-vi; V-VI
Plagal	Sd-T	IV (iv, VI, vi, ii, ïï) - (I ó i)
Semicadencia dominante	T-D; Sd-D	[Cualquier grado con función T o Sd] - V(v, vii, vii)
Semicadencia subdominante	T-Sd; Sd-Sd	[Cualquier grado con función T o Sd] - [Cualquier grado con función Sd]

En nuestro grafo, cada nodo representa un posible acorde con una función tonal en una tonalidad. Una arista es un movimiento entre acordes, y por tanto, una cadencia. Para poder buscar el mejor camino en el grafo que nos dé como resultado el mejor análisis, debemos establecer pesos para esas aristas.

El problema principal aquí es cómo establecer los valores para esos pesos, debido a que el rendimiento del sistema es muy sensible a ellos. Por otra parte, estos valores pueden estar condicionadas por el género de la música. Por ejemplo, se han acotado progresiones funcionales y composiciones acórdicas que en el barroco no son válidas pero que en la música de jazz sí lo son. Por lo tanto, se necesita de un conjunto de entrenamiento para ajustar los valores de peso de un género musical.

Se establece un coeficiente de entorno armónico ( $ce_h$ ), al igual que ocurría con el melódico, beneficiando a los acordes que se ubican alrededor de giros cadenciales y penalizando los cambios de tonalidad dentro del  $ce_h$  (véase Cuadro 3.6).

Según el  $ce_h$ , un acorde que puede ser considerado dentro del propio  $ce_h$ , y que no incumple ninguno de los parámetros establecidos anteriormente, como la regresión armónica, se incluye dentro de la tonalidad al que pertenece el  $ce_h$ .

Este trabajo relaciona el entorno de las funciones tonales y busca la mejor relación de funciones evaluando positivamente aquellas que cumplan alguna de las condiciones que se redactan en el Cuadro 3.6 y negativamente las que incumplan algunas de ellas.

## CAPÍTULO 3. ANÁLISIS TONAL

---

En ciertas relaciones funcionales se tiene que cumplir algunas condiciones para obtener la puntuación máxima. En la función de dominante, al realizar una cadencia perfecta o rota, ésta debe de ser un acorde mayor de cuatriada (con la séptima menor), es lo que llamamos séptima de dominante. Cuando se cumple esta condición y la relación armónica es de V-I o V-i se le atribuye el máximo valor. La relación de armonía vii-I o vii-i (el séptimo grado con séptima menor o disminuida) se le atribuye un valor un poco inferior a la cadencia perfecta V-I o V-i. El séptimo grado debe de poseer obligatoriamente la séptima del acorde para evitar confusiones con la relación armónica ii-III del modo menor. La cadencia vii-I o vii-i tiene un valor de 2300. Al igual que ocurre con las cadencias anteriores, en la cadencia rota la función de dominante debe de cumplir dichas condiciones. Esta cadencia posee un valor de 2100.

El peso de una cadencia se tiene que establecer cuando la función de dominante consta de un acorde de cuatriada, de esta manera se evita en lo posible las falsas cadencias producidas por la secuencia de la tónica a la subdominante (I-IV) en el modo mayor y la mencionada en el párrafo anterior supertónica-mediate (ii-III) en el modo menor. No obstante si el acorde con función de dominante no es de cuatriada, la cadencia también se evalúa pero con un valor inferior. Si la relación es de [V (triada) - I] el valor que se le atribuye es 1900 y si es vii - (i o I) el valor es 1600.

La detección de las cadencias y semicadencias es el indicio principal para el reconocimiento de una tonalidad en un punto dado, de tal manera que una secuencia de acordes analizadas desde dos tonalidades diferentes nos produce dos cadencias/semicadencias diferentes. Los pesos que se establecen entre las distintas cadencias se introducen en el grafo, el cual nos une los nodos  $f_a$  y  $f_b$  en capas adyacentes por medio de la función de pesos  $d(f_a, f_b)$ . Los valores para esta función se muestran en el Cuadro 3.6, junto con las relaciones de pesos entre  $f_a$  y  $f_b$ . Una cadencia es más concluyente cuanto mayor sea el peso que se le asigna a la misma. Cada secuencia entre las distintas funciones tonales producirá un valor de peso distinto, de tal manera que la ruta con la suma mayor de pesos será seleccionada como la más adecuada.

Los valores del Cuadro 3.6 se han establecido empíricamente. Además se ha asignado un valor negativo para reflejar la regresión tonal  $D \rightarrow S$ . Tonalidad sólo cuando se encuentra una cadencia en una nueva tonalidad. Las progresiones que no son factibles (especificadas en la sección 3.5.1) se ponderan con  $-\infty$ .

Una vez el grafo está construido, la selección del mejor camino se reduce al problema clásico del cálculo del mejor camino en un grafo usando programación dinámica (Brassard and Bratley, 1997). Los nodos visitados en este camino se toman como el mejor análisis. Esos nodos aparecen rellenos en el ejemplo de la Figura 3.52. El resultado, incluyendo las funciones tonales, grados y cambios de tonalidad se han añadido como un nuevo pentagrama “Analysis” en la partitura (véase la Figura 3.51, pentagrama inferior).

### Aprendizaje computacional de pesos de aristas ( $ce_h$ )

Un punto débil de la propuesta anterior de especificación de los pesos de las aristas, es su carácter empírico. Un pequeño cambio en el repertorio implicaría una nueva estimación manual de pesos. Para superar este problema hemos utilizado un algoritmo

### 3.5. GRAFO PARA LA OBTENCIÓN DEL MEJOR ANÁLISIS POSIBLE

Cuadro 3.6: Las relaciones entre las funciones tonales dentro de la misma tonalidad y sus correspondientes pesos. Los pesos de la relación  $D \rightarrow T$  dependen de las características de los acordes que forman estas funciones tonales.

De ( $f_a$ )	a ( $f_b$ )	Peso ( $ce_h$ )
T	D	26
T	S	75
T	T	1
S	D	100
S	T	145
S	S	1
D	S	-101
D	D	1
D	T	
Triada V perfecta con 7 <sup>a</sup> menor	{ $\bar{I}, i$ }	2500
Triada V perfecta con 7 <sup>a</sup> menor	{ $\bar{VI}, vi$ }	2100
Triada V perfecta	{ $\bar{I}, i$ }	1900
Triada $\bar{vii}$ con 7 <sup>a</sup> menor	I	2300
Triada $\bar{vii}$ con 7 <sup>a</sup> disminuida	i	
Triada $\bar{vii}$	I	1600
Triada iii menor con 7 <sup>a</sup> menor	I	1550
Triada III aumentada con 7 <sup>a</sup> mayor	i	
Triada iii menor	I	1500
Triada III aumentada	i	

## CAPÍTULO 3. ANÁLISIS TONAL

---

genético. El cromosoma codifica el conjunto de pesos para ser optimizado. Cada gen representa un peso. Los valores válidos para cada rango de peso se basan en los utilizados en la tabla de pesos manuales (Cuadro 3.6).

Un sistema de calificación evalúa su idoneidad para hacer el análisis correctamente. Un experto, analiza de forma manual un conjunto de corales de Bach. El algoritmo trata de minimizar el número de errores cometidos por el sistema de análisis en comparación con el experto ventana a ventana temporal, devolviéndonos al final del proceso los valores más adecuados para minimizar el número de errores. Esta función de calificación nos devuelve unos pesos muy cercanos al conjunto de pesos realizados por un experto de forma empírica.

El sistema ha sido implementado mediante JGAP<sup>3</sup> usando la configuración por defecto.

Una vez que se construye el grafo, la selección de la mejor ruta se reduce al problema clásico de la computación de la mejor trayectoria en un gráfico usando programación dinámica (Brassard and Bratley, 1997). Los nodos que obtienen una mayor puntuación se toman como el mejor análisis. Esos nodos aparecen marcados en el ejemplo de la figura 3.52. El resultado, incluyendo funciones tonales, grados, y los cambios de tonalidad se añaden en un pentagrama nuevo llamado “Analysis” (véase el pentagrama más bajo de la Figura 3.51).

### 3.5.2. Análisis melódico ulterior

Después del cálculo del mejor camino en el grafo, el sistema ha seleccionado qué acorde, función tonal y tonalidad es el mejor para cada ventana. El primer paso del análisis (el paso de análisis melódico) dejó algunas notas con normas contradictorias no pudiendo clasificarlas en notas armónicas o no armónicas. Ahora, después de haber resuelto la armonía de toda la pieza, esas notas son etiquetadas como extrañas cuando no pertenecen al acorde subyacente.

## 3.6 Experimentos

---

Se ha resuelto utilizar el formato MusicXML en lugar de otros (como por ejemplo el MIDI, MUS, SIB, ETF...) porque tiene una doble cualidad: ser de libre distribución y, además, facilitar toda información que necesitamos, como los elementos que mencionamos anteriormente y, por tanto, el análisis que se puede hacer es más exhaustivo y riguroso, no dando lugar a malas interpretaciones debido a la ausencia de información.

Para probar el sistema se han usado los corales armonizados de J. S. Bach (BWV-253, 26, 437, 29, 272 y 438), descargados originalmente del sitio web de Humdrum<sup>4</sup>. El corpus etiquetado manualmente se puede descargar desde nuestra sede web<sup>5</sup>.

---

<sup>3</sup><http://jgap.sourceforge.net/>

<sup>4</sup><http://kern.humdrum.net/>

<sup>5</sup><http://grfia.dlsi.ua.es/cm>

## 3.6. EXPERIMENTOS

El sistema se ha evaluado usando los tantos por ciento de acierto de la tonalidad, el acorde y su función tonal con los valores manualmente etiquetados. Así, los valores posibles de tonalidad son una de las veinticuatro posibilidades (12 tonos mayores y 12 tonos menores), los acordes son los siete grados (I, II, III, IV, V, VI, VII), y las tres funciones tonales posibles (T, D, S).

Cuadro 3.7: Comparación de tasas de acierto (en%) para el sistema utilizando ponderaciones fijas (“pesos empíricos”) y el sistema con pesos aprendido por el algoritmo genético (“pesos genéticos”). G: Grado; FT: función tonal; T: Tonalidad.

	pesos empíricos			pesos genéticos		
	G	FT	T	G	FT	T
BWV-26	73	80	64	91	95	82
BWV-272	81	61	21	51	66	43
BWV-29	79	79	50	74	79	50
BWV-253	73	79	15	65	73	31
BWV-437	60	71	56	64	74	64
BWV-438	68	73	71	79	88	86

El sistema de cálculo de pesos basado en algoritmo genético se ha ejecutado usando los siguientes valores: un cromosoma formado por 25 genes, uno por cada peso a optimizar, en los que se codifica binariamente el rango de valores  $[-3000, 1000]$ , la función de *fitness* intenta minimizar el número de ventanas mal clasificadas. Finalmente, el algoritmo genético se ha ejecutado con 300 generaciones y una población de 100 individuos.

El Cuadro 3.7 muestra los resultados utilizando el sistema anteriormente descrito usando tanto pesos establecidos empíricamente como con pesos aprendidos con el algoritmo genético. Dado el pequeño conjunto de datos que tenemos, hemos usado un esquema *leave-one-out*, es decir, entrenamos con todos los corales menos uno y probamos con el resto, y así con todos los corales. En cada experimento de *leave-one-out* el número de ventanas analizadas en las corales dejadas en el conjunto de test es de 872 en promedio. Como el experimento se ha realizado 6 veces, podemos establecer el número de ventanas analizadas en este experimento como 5.232.

Los resultados muestran que los porcentajes de reconocimiento de los grados, funciones tonales y tonalidades por el algoritmo genético superan en casi todos los casos al sistema utilizando pesos establecidos por un experto humano. La mayoría de los errores se producen en los modos tonales.

### 3.6.1. Discusión cualitativa de los resultados

En este apartado vamos a detallar los aciertos y errores en cada uno de los corales, realizando un análisis comparativo entre el sistema computacional y el humano, y explicando el porqué de las decisiones analíticas tomadas.

## CAPÍTULO 3. ANÁLISIS TONAL

---

Debemos de destacar de nuevo la ineficacia de dar un porcentaje de aciertos y de errores en los resultados obtenidos, ya que nuestro sistema no se basa en la estadística sino en reglas, y además, el análisis es propicio a diferentes interpretaciones (con lo que podría darse el caso de que dos análisis distintos fuesen correctos).

El sistema se ha ejecutado usando los pesos del Cuadro 3.6 establecidos manualmente. Además de indicar los lugares donde el sistema falla, mostramos la razón por la cual creemos que lo hace. Tenemos en cuenta en la discusión las limitaciones actuales de éste y que esperamos podamos superar en el futuro:

- Retroalimentación y ratificación. Como anteriormente ya se ha comentado, el análisis melódico depende en parte del acórdico y viceversa. Actualmente estamos realizando el proceso de manera secuencial, sólo realimentamos el resultado del análisis melódico corrigiendo las etiquetas incorrectas en función del análisis armónico. Lo ideal sería realizar el proceso de manera iterativa hasta que convergieran los resultados de las distintas fases.
- Algunas de las reglas descritas no se encuentran en el sistema experto por ser imposible implementarlas, por el hecho de que en ocasiones éstas requieren la modificación de la partitura original, por ejemplo, dividiendo una blanca en dos negras.

Hemos incluido un análisis completo, el del coral 25, en el anexo A, donde se detalla tanto el análisis resultante como las reglas usadas.

Se pueden descargar las obras analizadas y los grafos de análisis completos de la página web <http://grfia.dlsi.ua.es/cm/worklines/icmc2007/index.php>.

### **Coral 25:**

Comienza detectando correctamente la tonalidad de La menor. La armonía de los tres primeros compases y su respectiva función tonal es correcta, exceptuando:

- El final del segundo compás, donde detecta un cambio de función tonal en el tercer grado (de T a S). Lo correcto es no cambiar la función tonal (T).
- El acorde numerado como 27, detecta que es un cuarto grado. Lo correcto es no catalogarlo como acorde, ya que la nota que hace formar ese acorde es una nota extraña (bordadura). Como así lo detecta correctamente en el análisis melódico.
- Aunque se da a interpretaciones, el acorde 21 lo detecta como sexto grado y no se debe de evaluar porque se forma por la superposición de dos notas extrañas (p), detectadas correctamente por el análisis melódico.

El primer error importante lo encontramos en la secuencia de acordes 48 a 55. En realidad son dos acordes que producen una cadencia rota en Sol mayor. El sistema nos devuelve una sucesión del cuarto grado al tercer grado en La menor. Creemos que esto es debido a que en el acorde 51 y 52 hay una apoyatura. Esta apoyatura hace que en



Sol mayor la secuencia de acordes posean una función tonal de D a S, mientras que en Lam la secuencia que se obtiene es S a T. Este problema también se solucionará con la realimentación.

El segundo error con importancia se ubica en la secuencia de acordes 56 a 61. El sistema detecta la secuencia funcional S, T, D, T, en Fa menor, cuando lo correcto hubiese sido en Do mayor. Sabemos que el problema es debido a la nota Lab ubicada en la secuencia 56 a 59. Este es el único problema encontrado hasta ahora que no sabemos cómo solucionar, aunque sabemos la causa del error.

El sistema detecta correctamente la modulación a Do mayor en la secuencia 62 a 71, volviendo a la tonalidad principal (La menor) en el acorde 72.

El compás 10 (secuencia 76 a 93) está totalmente mal analizado: el sistema lo analiza todo en La menor y debería de haber modulado a Sol mayor en la secuencia 76 a 87 y a Do mayor en la secuencia 88 a 93. Estos errores se han producido al modificar los pesos de la tabla de relaciones funcionales (Cuadro 3.6), que aún dando mejores tasas de acierto global, introducen errores no cometidos anteriormente.

El sistema continúa realizando un análisis correcto hasta el final de la obra, detectando incluso la tercera de picardía en el último acorde (secuencia 104 y 105).

Debemos de indicar que los errores obtenidos por la armonía (exceptuando la secuencia 56 a 61) son consecuencia de que el sistema detecta todos los acordes posibles en esta primera fase. Con la realimentación y ratificación, que introduciremos más adelante en la presente investigación, esperamos poder solucionar estos errores.

### **Coral BWV 262**

El sistema detecta correctamente la tonalidad principal de Sol menor.

Realiza un análisis totalmente correcto en los dos primeros compases, detectando incluso el acorde napolitano en la secuencia 18 y 19.

Modula perfectamente a Re menor en la secuencia 20 y 21, cometiendo un error en la secuencia 22 y 23, ya que modula a Si menor y es tónica de Re menor. En los dos siguientes acordes (secuencia 24-27) modula correctamente a Re menor y a partir de la secuencia 26 y 27 a Sol menor. La tonalidad de Sol menor (secuencia 26-44) es analizada correctamente.

Toda la secuencia de Re menor (48 a 68) es analizada correctamente, incluso detecta el acorde napolitano (64).

Uno de los puntos pendientes es hacer que el sistema module correctamente. Un ejemplo de este error es la modulación que se produce en la secuencia 69, modulando a Sol menor en un subtiempo.

La tonalidad de Sol menor (69-82) también es analizada correctamente.

Se tendría que haber modulado a Do menor en el acorde 83, pero el sistema modula en el 85.

La tonalidad de Do menor y la siguiente modulación a Re menor (85-98) es analizada correctamente por el sistema. El sistema detecta correctamente la tercera picarda.

## CAPÍTULO 3. ANÁLISIS TONAL

---

### Coral BWV 269

El sistema detecta correctamente la tonalidad de la obra (Sol mayor).

Detecta la cadencia rota que se produce en la secuencia 15 y 16, atribuyéndole al sexto grado la función de T. Se puede comprobar como en el acorde 7 se le atribuye la función de S al sexto grado y en el acorde 15 se le atribuye la función de tónica al sexto grado. Esto es debido al entorno funcional de nuestro trabajo, factor que Taube [Taube \(1999a\)](#) no tiene en el suyo.

De la secuencia 89 a 98 modula el sistema a Do mayor de forma correcta, realizando la cadencia perfecta en Do mayor.

A partir del acorde 100 se vuelve a modular a Sol mayor. Terminando la obra sin ningún otro error.

### Coral BWV 364

Una obra bastante difícil de analizar, incluso para los alumnos de grado superior de música. La obra tiene en la armadura un bemol y la tonalidad es Sol menor. Esto es debido, a que la melodía coral está en una modalidad, en concreto, la llamada Protus (Dórico para algunos tratadistas). Cuando Bach armoniza esta melodía, mantiene su modalidad pero le da un carácter tonal.

Cualquier trabajo que se base en la armadura para detectar la tonalidad, erraría en estos casos, emitiendo un FA mayor como respuesta. Nuestro sistema de detección posee otras características que permiten dar respuestas mucho más exactas, que son capaces de detectar correctamente la tonalidad, ya que la obra se termina con un análisis en Sol menor.

Aunque la obra comienza en Sol menor, nuestro sistema detecta la tonalidad de Lam. Esto es debido a que el comienzo es modal. Es decir, al tener un solo bemol y no alterar el séptimo grado (Fa $\sharp$ ) el sistema no consigue detectar correctamente la tonalidad inicial.

El sistema detecta La menor porque la primera cadencia que se hace es en esta tonalidad (secuencia de 16 a 20). Y luego, el sistema detecta correctamente la modulación a Re menor (secuencia de 20 a 27) y la analiza en consecuencia.

La segunda modulación es hacia Sol menor. El sistema la detecta correctamente pero erra en el lugar de la modulación. El sistema modula en el acorde 34 y debería haber modulado en el acorde 31. Esto es debido a que la cadencia que se produce entre los acordes 31 y 32 no tiene la sensible alterada (Fa $\sharp$ ).

Desde el acorde 63 al 88, la tonalidad es Re menor, y el sistema lo analiza sin ningún problema.

Del acorde 89 al final de la obra se vuelve a la tonalidad principal (Sol menor). El sistema lo analiza correctamente, detectando incluso la tercera picarda del final de la obra, además de la cadencia perfecta.

### Coral BWV 367

La tonalidad de la obra es analizada como Do mayor. Toda la armonía de esta tonalidad es analizada correctamente.

El sistema modula a Sol mayor en el acorde 16, aunque lo lógico es haber modulado en el acorde 21 y de esta manera recoger la cadencia rota en Do mayor (19-20). Por lo tanto la modulación es correcta pero erra en el lugar de la modulación.

En el acorde 35 modula a La menor pero debería haber modulado a Do mayor (y realizar la cadencia perfecta) y modular posteriormente a La menor (acorde 40).

Existe una sección de transición entre La menor y Sol mayor, que el sistema se lo atribuye a la tonalidad precedente (La menor). Este pasaje que corresponde a la secuencia 50 a 59, no posee una clara armonía tonal, con lo que se le atribuye como correcto el análisis del sistema.

Del acorde 60 al 73, el sistema analiza correctamente todos los acordes dentro de la tonalidad de Sol mayor.

Modula a Mi m desde el acorde 74 al 82, cuando en realidad es desde el 76 al 81. Por lo tanto, como nos ha ocurrido en varias ocasiones, detecta correctamente la modulación pero erra en el lugar exacto de la modulación. En las líneas de trabajo futuro se contempla añadir un apartado dedicado exclusivamente a las modulaciones para mejorar el comportamiento del sistema a este respecto.

Del acorde 83 al final de la obra se vuelve a la tonalidad principal (Do mayor). Analizando el sistema correctamente todos los acordes dentro de dicha tonalidad.

#### **Coral BWV 400**

El coral comienza en Mi $\flat$  mayor, aunque en la partitura aparece Mi mayor, es debido a una errata gráfica sin mayor importancia.

A partir del acorde 35 el sistema modula a Do menor, pero debería haber modulado a Si $\flat$  mayor, hasta el acorde 61. Esto implica un error que debería de ser revisado.

En la secuencia comprendida del 62 al 89 el sistema analiza correctamente todos los acordes dentro de la tonalidad de Do menor.

A partir del acorde 92, el sistema retoma la tonalidad principal. Cabe la posibilidad de que los acordes 90 a 92 formen una cadencia perfecta en La $\flat$  mayor, aunque el sistema no lo ha detectado.

En esta obra hemos tenido prácticamente cinco compases erróneos consecutivos, creemos que es debido a que la secuencia funcional de los acordes de Do menor y Si $\flat$  mayor favorecen a Do menor por la continuidad de dicha tonalidad (Do menor).

#### **Coral BWV 308**

La tonalidad principal de la obra es analizada de forma incorrecta como Mi menor y comienza también de forma incorrecta en Re mayor. La tonalidad principal está en La mayor.

A partir del acorde 15 detecta correctamente la modulación a Mi mayor y todo el análisis es correcto hasta el acorde 39.

Del acorde 40 al 44 modula correctamente a Fa mayor, analizando todos los acordes de forma correcta.

Del acorde 46 al 48 analiza de forma correcta una cadencia en Si menor.

## CAPÍTULO 3. ANÁLISIS TONAL

---

Del 49 al 58 vuelve a modular de forma correcta a la tonalidad de La mayor, analizando los acordes correctamente dentro de esta tonalidad.

Detecta y analiza la cadencia perfecta entre los acordes 59 y 60 en la tonalidad de Mi mayor.

También analiza la cadencia rota producida entre los acordes 61 y 62 en la tonalidad de La mayor.

Como hemos comentado anteriormente, erra en la tonalidad final de la obra. Entendemos que es porque se realiza una cadencia perfecta en la tonalidad de Mi mayor. Se ha estudiado por qué ha analizado incorrectamente este final de obra. Es el único caso de todas las obras analizadas donde nos ha errado la tonalidad principal de la obra. Creemos que es debido a un problema de ajuste de “pesos” de las artistas ( $ce_n$ ), aunque el error de detectar Mi menor en vez del supuesto Mi mayor no sabemos a qué es debido.

### 3.7 Conclusiones sobre el sistema de análisis tonal

---

Los resultados obtenidos han sido satisfactorios, superando incluso al trabajo de Taube que consideramos el mejor enfoque de los existentes. Principalmente superamos a Taube porque nuestro trabajo posee un entorno analítico, el cual le permite poder modular de una tonalidad a otra respetando las cadencias que se puedan producir en ellas.

Este trabajo nos ha permitido comprender la dificultad que entraña el “enseñar” a un ordenador la realización de un análisis musical. Es un trabajo muy concienzudo y determinado, donde lo más importante es comprender las capacidades y limitaciones de un ordenador, y a partir de ahí, estructurar y construir, peldaño a peldaño, todos los cimientos que nos sostengan en el trabajo.

Aunque el trabajo actualmente funciona razonablemente bien en los corales armonizados de J. S. Bach con los que se ha probado (coral 25, BWV 269, BWV 364, BWV 367, BWV 400, BWV 262 y BWV 308), puede tomarse como base y ampliarse a otras obras y estilos musicales, indexando nuevas reglas que complementen las existentes en este trabajo. Sin embargo, los resultados muestran que usando este enfoque estamos lejos de obtener unas tasas de acierto aceptables para un analista profesional. Esto se debe en parte a que hay partes importantes que se encuentran todavía sin implementar, como son el análisis de Fux y *cambiata*, y la realimentación y la ratificación.

En la realimentación se pretenderá interactuar entre el análisis armónico, funcional y tonal con el análisis contrapuntístico. Según la realimentación, tanto el análisis armónico, funcional y tonal como el análisis contrapuntístico se modificarán hasta que todos los parámetros concuerden, o se descuadren los mínimos posibles. Por ejemplo, una nota que sea una apoyatura se analizará como tal, cuando después de comprobar la armonía, esta nota no pertenezca al acorde (y cumpla las condiciones melódicas de la apoyatura). Evidentemente, para que esto suceda se necesita de una realimentación que modifique los parámetros iniciales. Aunque el procedimiento iniciado en un principio nos hiciese pensar que con la realimentación podríamos conseguir corregir posibles errores analíticos, nos hemos dado cuenta de que este camino no nos iba a resolver de una manera práctica

### 3.7. CONCLUSIONES SOBRE EL SISTEMA DE ANÁLISIS TONAL

---

el trabajo de analizar una partitura, de tal manera, que en el siguiente capítulo, en base a lo expuesto en éste, vamos a cambiar radicalmente el sistema motor del análisis computacional.

Actualmente el sistema detecta los cambios de tonalidad, pero no los interpreta como modulaciones. En el futuro estudiaremos la inclusión de este mecanismo. Donde se detecte de forma exacta el lugar de la modulación y el tipo de modulación utilizado (modulación por acorde común, modulación por cromatismo y modulación por enarmonía, aunque Bach no realiza este último tipo de modulación).

Finalmente, una línea de trabajo futuro se basa en la inclusión de un sistema de errores, mediante el cual el programa nos determine el tipo de error que se comete, tanto armónico (ej. quintas u octavas consecutivas), tonal (acordes o notas que no pueden pertenecer a una tonalidad) funcional (regresión tonal) y contrapuntístico (ej. hacer una bordadura de una nota de paso, detectar una nota de paso por salto melódico,...).

# 4

## Análisis melódico mediante aprendizaje computacional

Comprobado que el máximo de acierto que obtenemos en la salida computacional mediante sistemas de reglas, aun siendo un buen resultado, no es viable para la práctica y ayuda común del usuario, recurrimos a las técnicas de aprendizaje computacional y de reconocimiento de patrones. Para estudiar la idoneidad de estas técnicas sobre nuestro problema, nos centramos, de todo el proceso de análisis musical, única y exclusivamente en el análisis melódico. Así, este capítulo se centra en el análisis melódico, utilizando en concreto como entrada un formato simbólico. Por lo tanto, como salida, cada nota en una obra musical se clasifica como nota real (o nota armónica) cuando pertenece al acorde que subyace, y como nota extraña (nota no armónica) cuando no pertenece a la armonía subyacente, en cuyo caso se debe asignar más de una categoría: nota de paso, bordadura (floreo), retardo, anticipación, escapada, apoyatura, etc. (véanse ejemplos en el capítulo anterior).

Este capítulo está estructurado de la siguiente manera. En primer lugar se introduce brevemente el paradigma de reconocimiento de formas clásico (PR) (sección 4.1). A continuación describimos los algoritmos usados para aprender computacionalmente las reglas del análisis melódicos. Finalmente exponemos los resultados y analizamos los conjuntos de reglas generados.

### 4.1 Análisis melódico mediante reconocimiento de patrones clásico

---

Los métodos computacionales usados en este capítulo para solucionar el análisis melódico se basan en la aplicación de técnicas de reconocimiento de patrones a la clasificación de notas en la partitura en siete categorías: notas reales más 6 clases de notas extrañas. De esta forma, podemos considerar esta tarea como un problema de clasificación de siete clases en reconocimiento de patrones. Para ello podemos considerar que cada nota es una muestra de entrada  $x_i$ . A partir de la muestra y su contexto  $(x_{i-1}, x_i, x_{i+1})$ , se pueden calcular varias características expresadas como un vector de características  $\mathbf{x}_i$ , que se pueden ver como una evidencia para categorizar la nota  $i$ -ésima. Con esta información, el modelo subyacente  $\mathcal{M}$  debería emitir una hipótesis  $\hat{h}_i$ ,

## CAPÍTULO 4. A. MELÓDICO CON APRENDIZAJE COMPUTACIONAL

clasificando esa muestra de entrada en una de las siete clases:  $\hat{h}_i \in \mathcal{H} = \{H, P, N, S, AP, AN, ES\}$ , es decir, la nota quedará etiquetada como reale (H), paso (P), bordadura o floreo (N), retardo (S), apoyatura (AP), anticipación (AN), o escapada (ES).

Normalmente se infiere  $\mathcal{M}$  a partir de pares de entrada  $(\mathbf{x}, h) \in \mathcal{X}$  proporcionados al sistema en la fase de entrenamiento, en la cual se ha seguido una estrategia de minimización del error por  $h$  incorrectas. Una vez se ha entrenado el sistema consiguiendo una medida de error aceptable, se aplica el modelo a muestras nuevas no vistas previamente. En esta fase, la decisión sobre cada muestra es la hipótesis  $\hat{h}_i$  que maximiza el valor de la probabilidad a posteriori estimada  $\Pr(h_i | \mathbf{x}_i)$ , considerando que este valor se obtiene del modelo aprendido:

$$\hat{h}_i = \arg \max_{h \in \mathcal{H}} \Pr(h | \mathbf{x}_i) \approx \arg \max_{h \in \mathcal{H}} P_{\mathcal{M}}(h | \mathbf{x}_i) \quad (4.1)$$

La entrada que se pasa al sistema de clasificación es una serie de vectores  $\mathbf{x} = \mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_{|M|}$ , donde  $|M|$  es el número de notas en la melodía. La salida es una secuencia de decisiones  $\mathbf{h} = h_1, \dots, h_{|M|}$  (véase fig 4.1).

(a) BWV 286, segundo compás

(b) BWV 422, compases 12 y 13

Figura 4.1: Ejemplos de notas extrañas en un análisis melódico. Las notas no etiquetadas en esta partitura son reales.

Existen multitud de métodos capaces de aplicar esta metodología (Duda et al., 2001). De entre todos, consideraremos solamente aquellos métodos de aprendizaje por computador que nos permitan extraer reglas automáticamente, a partir de ejemplos etiquetados, como las vistas anteriormente en la Sección 3.2, en la página 53, con el objetivo de poder mostrar al usuario en último término las razones por las que se ha realizado el análisis que se da como salida.

Encontramos dos estrategias, aquellas que generan un sistema en el que las reglas se basan solamente en el vector de características  $\mathbf{x}_i$  y aquellos que modelan las relaciones lógicas entre una nota dada y su contexto, como la denominada programación lógica inductiva (*inductive logic programming* - ILP).

## 4.1. A. MELÓDICO MEDIANTE RECONOCIMIENTO DE PATRONES CLÁSICO

### 4.1.1. Aprendizaje a partir de vectores de características

Éste es el método más utilizado para clasificar a partir de modelos entrenados a partir de muestras de entrenamiento. Aprenden las regularidades estadísticas encontradas en esos conjuntos de entrenamiento previamente etiquetados manualmente.

Del estudio del conjunto de datos de entrenamiento encontramos un gran desequilibrio de las clases: aproximadamente 89% de las notas en los corales armonizados de Bach son reales.<sup>1</sup> Así, seleccionamos el algoritmo RIPPER (Cohen, 1995) que tiene la capacidad de aprender a partir de conjuntos de entrenamiento desequilibrados. Este algoritmo genera las reglas añadiendo antecedentes a la regla hasta que ésta es un 100% precisa intentando todos los posibles valores para cada atributo y selecciona la condición con la mayor ganancia de información. Se consideran primero las clases menos predominantes, abordando así el problema del desequilibrio de las clases.

#### Características

Estos clasificadores recibe como entrada una nota,  $x_i$ , representada por un vector de características,  $\mathbf{x}_i$ , y da como salida una probabilidad para cada etiqueta:  $P(h_i | \mathbf{x}_i)$ , sobre qué decisión de clasificación,  $h_i \in \mathcal{H} = \{H, P, N, S, AP, AN, ES\}$ , se realizará. A continuación definiremos las características que se utilizan (algunas de ellas son similares a las introducidas en capítulo anterior, pero no necesariamente iguales).

**Definición 4.1.1**  $previousIntervalName(x_i) \in \mathbb{N}$

El intervalo absoluto de una nota desde su predecesor conforme se define en la teoría musical: unísono, segunda menor, segunda mayor, quinta justa, etc...

**Definición 4.1.2**  $previousIntervalDir(x_i) = \begin{cases} \text{no definido}, & i = 1 \\ \text{ascendente}, & \text{pitch}(x_i) > \text{pitch}(x_{i-1}) \\ \text{descendente}, & \text{pitch}(x_i) < \text{pitch}(x_{i-1}) \\ \text{igual}, & \text{pitch}(x_i) = \text{pitch}(x_{i-1}) \end{cases}$

**Definición 4.1.3**  $previousIntervalMode(x_i) \in \{\text{major}, \text{minor}, \text{perfect}, \text{augmented}, \text{diminished}, \text{double augmented}, \text{double diminished}\}$

Se calcula usando las reglas de la teoría musical usando  $previousIntervalName$  y el número absoluto de semitonos desde  $x_{i-1}$  hasta  $x_i$ .

**Definición 4.1.4**  $nextIntervalName$ ,  $nextIntervalMode$  y  $nextIntervalDir$  se definen de forma similar usando el intervalo de la nota  $x_{i+1}$  respecto a  $x_i$

**Definición 4.1.5**  $tied(x_i) \in \mathbb{B}$  es cierto sólo si la nota  $x_i$  está ligada a la nota  $x_{i-1}$ .

<sup>1</sup>Nótese que estamos incluyendo las cuatro voces de los corales, y normalmente el bajo contiene prácticamente sólo notas reales



## CAPÍTULO 4. A. MELÓDICO CON APRENDIZAJE COMPUTACIONAL

---

**Definición 4.1.6**  $rd(x_i) = duration(x_i)/duration(beat)$

La función de duración relativa determina la ratio entre la duración de  $x_i$  y la duración del pulso.

**Definición 4.1.7**  $ratio(x_i) = \frac{rd(x_i)}{rd(x_{i-1})} \times \frac{rd(x_i)}{rd(x_{i+1})}$

La función ratio se usa para comparar la duración relativa entre las duraciones de  $x_i$  y las de la nota anterior  $x_{i-1}$  y posterior  $x_{i+1}$ .

**Definición 4.1.8**  $meterNumerator(x_i)$  es el numerador de la métrica o signo de compás activo en el instante  $onset(x_i)$  en el que ataca la nota. El valor de  $onset(.)$  se define localmente en cada compás, dependiendo de la métrica, como la posición en el compas en términos de semicorcheas, contadas desde 0 a  $(16 \times \text{numerador} / \text{denominador}) - 1$ .

**Definición 4.1.9**  $instability(x_i)$  : dados  $onset(x_i)$  y  $meterNumerator(x_i)$ , la inestabilidad devuelve el valor relativo de la debilidad métrica de  $x_i$

Cuanto más fuerte sea el tiempo en el que la nota ataca, menor será su inestabilidad. La Tabla 4.1 detalla la lista de valores usados.<sup>2</sup>

Cuadro 4.1: Valores de inestabilidad expresados como una función de la posición del ataque de la nota para los diferentes compases en resolución de semicorchea.

Métrica	Valores de inestabilidad indexados por $onset(x_i)$
4/4	(1, 9, 5, 13, 3, 11, 7, 15, 2, 10, 6, 14, 4, 12, 8, 16)
2/4	(1, 5, 3, 7, 2, 6, 4, 8)
3/4	(1, 7, 4, 10, 2, 8, 5, 11, 3, 9, 6, 12)
6/8	(1, 5, 9, 3, 7, 11, 2, 6, 10, 4, 8, 12)
9/8	(1, 7, 13, 4, 10, 16, 2, 8, 14, 5, 11, 17, 3, 9, 15, 6, 12, 18)
12/8	(1, 9, 17, 5, 13, 21, 3, 11, 19, 7, 15, 23, 2, 10, 18, 6, 14, 22, 4, 12, 20, 8, 16, 24)

**Definición 4.1.10**  $nextInstability(x_i) = instability(x_{i+1})$  ; se refiere a la inestabilidad de la siguiente nota.

---

<sup>2</sup>Los valores de inestabilidad para los compases binarios se pueden obtener directamente usando los métodos descritos en [Martin \(1972\)](#). Para los compases ternarios y compuestos se necesita una extensión muy simple del método. Otro método adecuado para calcular este tipo de valores se presenta en la sección 8.2.1.2 ‘Metre structure’ en [Meredith \(1996\)](#)

## 4.1. A. MELÓDICO MEDIANTE RECONOCIMIENTO DE PATRONES CLÁSICO

### 4.1.2. Programación lógica inductiva

Se puede considerar al algoritmo de inducción de árboles *top-down* TILDE (Blockeel et al., 1998) como la primera extensión del algoritmo de árboles de decisión C4.5 (Quinlan, 2014) que extrae reglas de lógica de primer orden que podemos usar como reglas para clasificar muestras de entradas: en lugar de comprobar los valores de los atributos en los nodos del árbol, TILDE prueba predicados lógicos. Esto proporciona las ventajas tanto de los árboles de decisión proposicionales, eficiencia y técnicas de poda, y el uso de la lógica de primer orden, es decir, expresividad mejorada. Esa mejora en expresividad de la lógica de primer orden no sólo proporciona una especificación elegante y eficiente del contexto musical de una nota, sino que teóricamente además proporciona un modelo predictivo más preciso (Ramirez and Hazan, 2006).

Hemos aplicado el algoritmo de aprendizaje con el siguiente predicado objetivo, es decir, éste es el predicado a aprender: `melanalysis(A,B,[tag])`, donde `tag` es una de las etiquetas de análisis melódico, `A` es la concatenación del nombre de la canción y de la voz o parte, y `B` es la nota a etiquetar especificada con su posición dentro de la voz monódica.

Este predicado se construye a partir de la combinación de operadores lógicos de los siguientes predicados:

`succ(X,Y)` significa que `Y` es la siguiente nota a `X`

`pred(X,Y)` significa que `Y` es el anterior nota de `X`

`next_int(X,Y)` significa que `Y` es el intervalo respecto a la nota siguiente a `X`. Los intervalos se especifican usando una concatenación de las propiedades `previousIntervalName` y `previousIntervalMode` definidas anteriormente en la página 103.

`next_dir(X,Y)` es la dirección, ascendente, descendente o igual, del intervalo respecto a la siguiente nota de `X` tal y como se define en la propiedad `previousIntervalDir`.

`next_int(X,Y)` significa que `Y` es el intervalo respecto a la nota siguiente a `X` tal y como se define en la propiedad `nextIntervalDir`.

`prev_dir(X,Y)` es la dirección del intervalo respecto a la anterior nota de `X` tal y como se define en la propiedad `previousIntervalDir`.

`tied(X,Y)` indica si la nota `X` está ligada a la nota anterior cuando `Y = true`.

`ratio(X,Y)` se define como el *ratio* de la nota `X`.

`instability(X,Y)` se define como el valor de inestabilidad *instability* de la nota `X`.

En las definiciones que acceden al elemento anterior o siguiente, si la nota siguiente o anterior es un silencio, el valor especificado en el parámetro `Y` es el literal `withrest`.

Nótese que `succ(X,Y)` también significa que `X` es el predecesor de `Y`. El predicado `succ(X,Y)` permite la especificación de un contexto de tamaño arbitrario simplemente

## CAPÍTULO 4. A. MELÓDICO CON APRENDIZAJE COMPUTACIONAL

---

encadenando una serie de notas sucesivas:  $succ(x_1, x_2), succ(x_2, x_3), \dots, succ(x_{n-1}, x_n)$ , donde  $x_i$ , ( $1 \leq i \leq |M|$ ) es la nota de interés. Para entrenar el sistema utilizamos el siguiente predicado cuyos valores se corresponden con sus equivalentes anteriormente descritos:

```
melo(obra y voz / parte, índice de la nota, prev.interval, prev.interval.direction,
next.interval, next.interval.direction, tied, duration, ratio, instability)
```

Así, un conjunto de entrenamiento será una sucesión de predicados como las mostradas en la Figura 4.2:

```
melo(BWV-253-voice1,40,i2_MAJOR_ASCENDING,i2_MAJOR_DESCENDING,false,1.0,0.67,4).
melo(BWV-253-voice1,41,i2_MAJOR_DESCENDING,iOP,withrest,false,3.0,0.0,1).
melo(BWV-253-voice2,1,iOP,withrest,i1_PERFECT_EQUAL,false,1.0,0.0,4).
melo(BWV-253-voice2,2,i1_PERFECT_EQUAL,i2_MAJOR_ASCENDING,false,1.0,1.0,1).
...
```

Figura 4.2: Predicados de entrenamiento ILP.

El valor aprendido consiste en reglas como las que siguen en la Figura 4.3. En este ejemplo, la primera regla dice que una nota es real (armónica) cuando no está ligada a la nota anterior y el valor de inestabilidad es 5. La segunda dice que una nota C es de paso si no está ligada a la nota anterior, y que la nota que hay dos posiciones de C, indicada como E a través del predicado que obtiene el predecesor `pred`, tiene un intervalo de tercera menor respecto a su nota anterior.

```
melanalysis(A,B,C,[h]) :-
    tied(A,B,C,false),instability(A,B,C,5), !.

melanalysis(A,B,C,[n]) :-
    tied(A,B,C,false),instability(A,B,C,5),pred(A,B,C,D),
    pred(A,B,D,E),prev_int(A,B,E,i3_MINOR), !.
```

Figura 4.3: Predicados objetivo ILP.

## 4.2 Experimentos

---

Hemos ampliado el conjunto de datos del capítulo anterior: las transcripciones, en formato MusicXML, de algunos corales armonizados de J.S. Bach (BWV-26, 29, 253, 272, 274, 275, 280, 285, 437, and 438). Cada una de las 2528 notas se ha etiquetado manualmente como una de las 7 clases (armónica (h), paso (p), etc...) antes descritas.

Hemos aplicado los dos algoritmos antes descritos, RIPPER, e ILP, junto al sistema experto descrito en el Cuadro 3.1, además de un sistema que hemos denominado *simple* con las reglas más básicas implementables con estructuras de control *if-then-else*, que se

## 4.2. EXPERIMENTOS

suelen implementar en sistemas *MIR*: en concreto las reglas RL2.2, RQ1.3, RQ3.6 para las extrañas, etiquetando el resto como reales.

Se muestran los resultados en el Cuadro 4.2 para una configuración experimental de *leave-one-out*. Por la configuración experimental de los experimentos realizados en un sistema externo, no se ha podido separar el resultado por obra de ILP, y sólo podemos mostrar el total. El *baseline* corresponde a etiquetar usando siempre la clase más probable, es decir, etiquetar todas las notas como reales (h). Los resultados muestran que sí es posible mejorar el análisis usando técnicas de aprendizaje computacional. En este caso podemos decir que sólo el uso de RIPPER mejora significativamente los resultados sobre el *baseline* y sobre el sistema basado en las reglas establecidas por un experto. El sistema basado en ILP al menos alcanza los mismos resultados que el sistema experto, solamente mejorando su estabilidad.

Cuadro 4.2: Tasas de acierto de análisis melódico

Nº Coral	<i>Baseline</i>	Simple	Sistema Experto	RIPPER	ILP
26		66.2	92.7	96.9	
29		68.5	83.5	91.8	
253		68.1	87.6	88.2	
272		70.7	89.4	90.4	
274		66.5	91.0	86.7	
275		69.7	89.3	91.9	
280		79.7	82.9	95.7	
285		71.2	87.6	88.8	
437		76.7	83.3	85.6	
438		80.7	83.0	95.3	
Totales	85.6 ± 0.4	71.8 ± 5.1	87.0 ± 3.4	91.1 ± 3.7	87.2 ± 0.7

Una vez comprobado que RIPPER es capaz de superar el sistema de reglas humano, un aspecto que nos interesa es la capacidad de los algoritmos de extraer reglas con sentido musical, al menos, en el periodo barroco. Para estudiarlo hemos analizado todas las reglas que RIPPER ha generado usando una escala tipo *Likert* como la mostrada en el Cuadro 4.3. Desde un punto de vista musical, sólo una de ellas parece extraída de la teoría musical, no obstante, la mayoría de ellas son extremadamente similares a las reglas de la teoría musical. La diferencia entre las reglas aprendidas y las de la teoría musical es que las primeras ignoran condiciones que son comunes a la mayoría de notas en el conjunto de datos, por ejemplo intervalos de dos semitonos. Dado que es el intervalo más común en el conjunto de datos, no es sorprendente que el algoritmo no lo haya considerado como información discriminante. Además, el algoritmo ha generado, como se esperaba, grupos de reglas que se podrían fusionar en una sola parecida a la de la teoría musical.

## CAPÍTULO 4. A. MELÓDICO CON APRENDIZAJE COMPUTACIONAL

---

Cuadro 4.3: Análisis tipo escala Likert de las reglas. La regla que ejemplifica el la línea *De acuerdo* necesitaría la condición  $nextInterval = 2$  para estar totalmente correcta. La regla para *Ni de acuerdo ni en desacuerdo*, contiene cláusulas irrelevantes ( $nextIntervalMode = MAJOR$ ), y por el contrario, falta  $nextInterval = 2$  y el factor de inestabilidad debería reducirse. Respecto a la regla *En desacuerdo*, es irrelevante porque es totalmente ambigua

Análisis musical	#Reglas	Regla de ejemplo
Totalmente de acuerdo	1	$prevIntervalDir = EQUAL \wedge duration \leq 0,5 \wedge \neg tied \wedge nextIntervalDir = DESC \wedge instability \leq 3 \wedge nextInterval \leq 2 \wedge nextIntervalMode = MINOR \wedge ratio \leq 0,5 \rightarrow melodictag = appoggiatura$
De acuerdo	20	$instability \geq 5 \wedge nextIntervalDir = ASCENDING \wedge prevIntervalDir = DESCENDING \wedge prevInterval \leq 2 \wedge nextIntervalMode = MAJOR \rightarrow melodictag = neighbor$
Ni de acuerdo ni en desacuerdo	15	$tied \wedge nextIntervalMode = MAJOR \wedge duration \geq 2 \rightarrow melodictag = suspension$
Desacuerdo	3	$instability \geq 5 \wedge instability \geq 13 \wedge instability \leq 13 \wedge prevIntervalDir = DESCENDING \wedge nextIntervalMode = MINOR \rightarrow melodictag = neighbor$
Muy en desacuerdo	0	

En el Anexo B se detalla el análisis de todas las reglas generadas por el sistema. Este proceso se ha realizado también con las reglas extraídas con ILP que se detallan en el mismo anexo.

### 4.3 Conclusiones

---

La hipótesis de este capítulo de que el sistema basado en reglas manuales podía ser mejorado usando un sistema de aprendizaje computacional se ha mostrado correcta según los resultados obtenidos.

Parece que es de hecho posible extraer reglas de análisis automáticamente a partir de ejemplos usando este tipo de sistemas. Sin embargo, las reglas resultantes, aun siendo más efectivas que las manuales establecidas por un experto, no son utilizables en un sistema de docencia musical donde al alumno se le dé, además de la etiqueta melódica, la explicación musical de las razones por las que el sistema ha tomado las decisiones.

A priori, una forma de mejorar el sistema consiste en extender el conjunto de aprendizaje, especialmente con piezas que contengan una proporción mayor de notas extrañas. Creemos que esto podría mejorar la generalidad y la precisión del modelo de análisis melódico. No obstante, ésta no es la única forma de superar las tasas de acierto conseguidas como describimos en el siguiente capítulo.

# 5

## Análisis melódico interactivo

Como ya se discutió en la introducción, hoy en día no hay una forma común y estandarizada de medir la calidad de los análisis realizados por distintos métodos. Aún así, aunque existiera, se pueden obtener muchos análisis correctos distintos a partir de la misma obra musical, lo que refleja las distintas preferencias de diferentes analistas ([Hoffman and Birmingham, 2000](#)).

Sin embargo, está ampliamente aceptado que ninguno de los sistemas informáticos propuestos es capaz hasta el momento de hacer un análisis que satisfaga totalmente al musicólogo o músico, y lo que es peor, parece que ningún sistema puede ser construido para resolver totalmente el problema. El caso del análisis melódico es un buen ejemplo de la variabilidad de las diferentes interpretaciones que se pueden extraer, debido al hecho de que depende de la armonía, que a su vez se deriva de las partes que pueden o no estar disponibles o incluso no existir al hacer el análisis melódico, como las voces de acompañamiento.

[Maxwell \(1984\)](#) diferencia entre la “implementación computacional”, en el que la salida del sistema es el análisis final, y el “análisis asistido por la computadora”, donde la salida debe ser interpretada por el usuario. Actualmente, todos los sistemas propuestos en la literatura científica se pueden clasificar en el enfoque “implementación computacional”.

A fin de superar la limitación expuesta anteriormente, se introduce un sistema que sigue el “análisis asistido por ordenador”. Es decir, un análisis melódico interactivo, que integra métodos automáticos de clasificación, e interacciones realizadas por el usuario. Esto se logra en el presente trabajo mediante el uso del “reconocimiento interactivo de patrones” (Interactive Pattern Recognition, IPR), que en otras tareas ya ha demostrado exitosamente las ventajas de la acción del humano, como en la transcripción de imágenes de texto escritos a mano, señales de voz, traducción automática, o la recuperación de imágenes, entre otras (véase [\(Toselli et al., 2011\)](#) para una revisión de las técnicas y dominios de aplicación de las técnicas IPR). En el presente capítulo presentaremos evidencias experimentales que muestran que los IPR parece ser la forma adecuada de abordar el análisis melódico.

El capítulo se estructura de la siguiente forma. Nuestra propuesta para resolver el problema del análisis melódico usando los métodos IPR se describirán en la Sección [5.1](#). Se ha desarrollado un sistema basado en un interfaz gráfico para hacer valer las expectativas teóricas presentadas, y que se describen en la sección [5.4](#). Los resultados

## CAPÍTULO 5. ANÁLISIS MELÓDICO INTERACTIVO

---

experimentales se exponen en la Sección 5.5 y, por último, algunas conclusiones se redactan en la Sección 5.6.

### 5.1 Análisis melódico mediante reconocimiento de patrones interactivo

---

La disciplina de la interacción hombre-máquina multimodal es un campo está atrayendo cada vez más el interés de la comunidad científica, porque intenta resolver problemas realmente complicados en múltiples dominios.

La idea de añadir interactividad a los sistemas computacionales arranca desde las primeras etapas de la informática. Sin embargo, se ha explotado sólo una pequeña fracción del inmenso potencial de las sinergías entre las técnicas reconocimiento de patrones (PR) y la interacción multimodal. Los sistemas de informática musical tienen todas las características potenciales para que se le apliquen esta clase de técnicas: la propia naturaleza de la información musical (Lidy et al., 2007), la necesidad de modelos cognitivos (Temperley, 2001), dependencias temporales (Iñesta and Pérez-Sancho, 2013), adaptación a partir de la interacción humana (Pérez-García et al., 2011), etc.

Asumiendo que los sistemas más avanzados están lejos de ser perfectos, no sólo en términos de precisión, sino también respecto a su aplicabilidad a cualquier tipo de dato musical, parece ser necesaria la intervención humana, como mínimo para un proceso de corrección de la salida del sistema automático. Podría ser también interesante aprovechar el conocimiento del experto durante ese proceso de corrección y trabajar en técnicas que exploten eficientemente la información proporcionada en la interacción (que se basa en la experiencia del usuario) en el contexto de los sistemas adaptables.

Por tanto, la precisión del sistema es sólo un punto de partida y no la principal cuestión a evaluar. En los sistemas interactivos, la evaluación intenta medir la capacidad del sistema para aprovechar la retroalimentación del usuario y reducir el esfuerzo necesario para alcanzar la solución final correcta, a través de esquemas adaptables.

Situar al humano como parte del sistema en el paradigma interactivo requiere cambiar la forma con la que miramos los problemas en estas áreas. Los modelos PR clásicos se basan intrínsecamente en algoritmos de minimización de errores, por lo que deben ser revisados y adaptados a un nuevo criterio de minimización del esfuerzo del usuario (Toselli et al., 2011). Este nuevo paradigma conlleva nuevas oportunidades de investigación en las que se tienen en cuenta cuestiones relacionadas con el tratamiento de la información de retroalimentación proporcionada por el usuario en cada interacción para mejorar el desempeño del sistema de partida y el uso de los datos derivados de la interacción para reentrenar el sistema y ajustarlo en base al comportamiento del usuario y los datos empleados.

A continuación analizaremos estos aspectos de la investigación en IPR en más detalle, en el contexto de nuestra investigación.



### 5.1.1. Aprovechamiento de la retroalimentación

Hemos descrito la solución a nuestro problema como una hipótesis  $\hat{\mathbf{h}}$  codificando las clases de cada nota en la partitura a analizar. Estas hipótesis eran aquellas que maximizaban las probabilidades a posteriori individualmente para cada nota entre todas las posibles hipótesis. Ahora, en el esquema interactivo, el usuario observa la entrada  $\mathbf{x}$  y la hipótesis  $\hat{\mathbf{h}}$  y proporciona una señal de retroalimentación o *feedback*,  $f$ , en la forma de una hipótesis local que se restringe al dominio de las hipótesis  $\mathcal{H}$ , por lo que podemos afirmar que  $f \in \mathcal{H}$ . Por tanto, incluyendo esta nueva información en el sistema, la mejor hipótesis del sistema es ahora aquella que maximiza la probabilidad a posteriori, pero dados los datos y la retroalimentación:

$$\hat{\mathbf{h}} = \arg \max_{\mathbf{h} \in \mathcal{H}} P_{\mathcal{M}}(\mathbf{h} \mid \mathbf{x}, f) \quad (5.1)$$

y esto puede hacerse con o sin la variación del modelo  $\mathcal{M}$ . Una vez se calcula la nueva hipótesis, el sistema puede pedir al usuario que le dé más información de retroalimentación en una nueva interacción,  $k$ . Este proceso continúa hasta que la salida del sistema,  $\hat{\mathbf{h}}$ , es aceptable por el usuario.

La construcción de la nueva distribución de probabilidad y la resolución de la maximización correspondiente puede ser más difícil que los problemas equivalentes con distribuciones de probabilidad sin información de retroalimentación. La idea es realizar el análisis de nuevo tras cada entrada de retroalimentación,  $f_k$ , tomando esta información como una restricción a la nueva hipótesis de forma que la nueva  $\hat{\mathbf{h}}^{(k+1)} \in \mathcal{H}^{(k+1)} = \mathcal{H}^{(k)} - \hat{\mathbf{h}} \subset \mathcal{H}^{(k)}$ .<sup>1</sup> De esta forma, el espacio de las posibles soluciones se ha reducido, gracias a las correcciones del usuario pues el usuario está diciéndole al sistema que la hipótesis  $\hat{\mathbf{h}}$  no es válida. Claramente, cuantas más restricciones se añadan, mayor oportunidad para obtener mejores hipótesis.

Este proceso iterativo puede generar una historia de hipótesis,  $h' = \hat{\mathbf{h}}^{(0)}, \hat{\mathbf{h}}^{(1)}, \dots, \hat{\mathbf{h}}^{(k)}$ , de interacciones previas que al final lleven a una solución aceptable por el usuario. Teniendo esto explícitamente en cuenta:

$$\hat{\mathbf{h}}^{(k+1)} = \arg \max_{\mathbf{h} \in \mathcal{H}} P_{\mathcal{M}}(\mathbf{h} \mid \mathbf{x}, h', f) \quad (5.2)$$

puede mejorar la calidad de la predicción gradualmente a lo largo del proceso de corrección.

### 5.1.2. Adaptación del sistema a partir de la retroalimentación

La interacción humana ofrece una oportunidad única para mejorar el comportamiento del sistema para afinar el modelo subyacente. Todo lo tratado en la sección anterior se puede aplicar sin variar el modelo  $\mathcal{M}$ , restringiendo el espacio de soluciones a través de la retroalimentación, aproximando la solución.

---

<sup>1</sup> Para simplificar la notación hemos omitido que el vector  $\hat{\mathbf{h}}$  es realmente un miembro de producto cartesiano  $\mathcal{H}^{|\mathcal{M}|}$

## CAPÍTULO 5. ANÁLISIS MELÓDICO INTERACTIVO

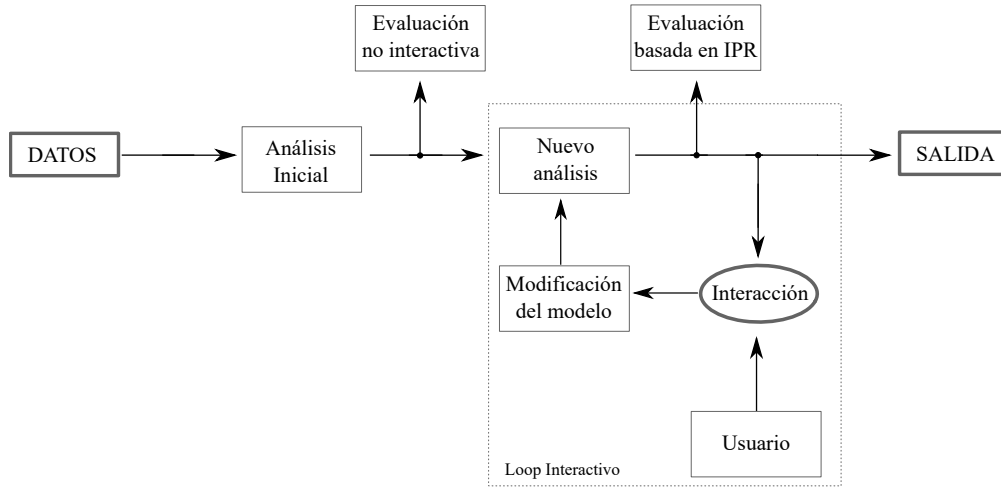


Figura 5.1: Enfoque IPR del proceso de análisis y su correspondiente evaluación, tanto para el sistema autónomo, como para el interactivo.

Podemos ir un paso más allá usando los datos de feedback obtenidos en cada paso del proceso de interacción,  $f_k$ , que se convierten en nuevo par válido de entrenamiento,  $(\mathbf{x}_i, h = f_k)$ . De esta forma, tras cada corrección disponemos de un nuevo conjunto de entrenamiento  $\mathcal{X}^{(k+1)} = \mathcal{X}^{(k)} \cup \{(\mathbf{x}_i, h = f_k)\}$ , que permite un nuevo entrenamiento o adaptación del modelo. Tras una serie de interacciones, el conjunto inicial de entrenamiento  $\mathcal{X}^{(0)}$  ha sido completado con nuevos pares *ground-truth* de entrenamiento.

La aplicación de estas ideas en nuestro sistema de análisis musical requiere que establezcamos criterios de evaluación adecuados. Estos criterios deberían permitir la comprobación de cómo los algoritmos de entrenamiento adaptativos aprovechan al máximo los datos derivados de la interacción para en último término minimizar el esfuerzo global del usuario.

La evaluación en este marco de trabajo interactivo es diferente de los algoritmos PR clásicos (véase Fig 5.1). En aquellos sistemas, el rendimiento se mide típicamente en término de errores de hipótesis base, es decir, cuántas hipótesis  $h_i$  difieren del vector de las etiquetas correctas (evaluación no interactiva en la Figura 5.1). Para ello, la evaluación se basa en corpora de entrenamiento y prueba que pueden ser fácil, objetiva y automáticamente probados y comparados, sin requerir la intervención humana en esos procedimientos de valoración.

En un marco de trabajo interactivo, sin embargo, el experto humano se incluye “en el bucle”, y el rendimiento del sistema debe ser medido en términos de cuánto esfuerzo humano se requiere para obtener los objetivos esperados. Aunque la evaluación del rendimiento del sistema en este nuevo escenario aparentemente requiere trabajo humano y toma de decisiones, especificando los objetivos y el *ground truth*, el paradigma de evaluación basado en corpus es aún así aplicable a la tarea del análisis musical, simplemente contando cuántas interacciones son necesarias para producir una hipótesis totalmente correcta (evaluación basada en IPR en la Figura 5.1).

### 5.1.3. Retroalimentación y propagación

El modelo subyacente de clasificación debe ser tal que proporcione una explicación comprensible del mecanismo de decisión, por lo que usaremos árboles de decisión. Se ha utilizado el algoritmo C4.5, usando las mismas características tanto para el enfoque clásico PR como para el sistema IPR. Este algoritmo calcula la probabilidad a posteriori  $P(h_i|\mathbf{x}_i)$  como la proporción de muestras en una hoja que pertenecen a cada clase (Margineantu and Dietterich, 2003) usando una corrección Laplaciana para suavizar las estimaciones de probabilidad.

Este algoritmo no permite la actualización incremental, pero entrena en muy poco tiempo. Así, en nuestro caso, se reentrena por completo tras cada interacción usando la nueva información proporcionada por el usuario. Este hecho no condiciona la usabilidad en el análisis al no llegarse a percibir el reentrenamiento en tiempo real y al tratarse de un conjunto de datos que nunca será masivo, pues las reglas de análisis son específicas a cada estilo, por lo que la escalabilidad no es un problema.

Como se introdujo en la Sección 5.1.1, cada vez que el usuario proporciona una retroalimentación  $f \in \mathcal{H}$ , se reconstruye el modelo como si el par  $(\mathbf{x}_i, h'_i = f)$  estuviese en el conjunto de entrenamiento.

Esto significa, además, que si el usuario corrige el análisis de una nota  $x_i$  con las características  $\mathbf{x}_i$  para que sea  $h'_i \neq \hat{h}_i$ , el análisis más adelante  $\hat{h}_j$  de notas  $x_j$ ,  $j \neq i$ , con características  $\mathbf{x}_j = \mathbf{x}_i$  debería ser el mismo, es decir, el análisis de ellas debería ser modificado de acuerdo a  $h'_j = h'_i$ . Este hecho se llama *propagación* y se realiza para el resto de notas  $x_j, \forall j \neq i$  tras la interacción del usuario sobre la nota  $x_i$ .

## 5.2 Método

El modelo en los sistemas IPR se puede construir utilizando cualquiera de los clasificadores empleados en sistemas PR clásicos. Para comprobar la mejora de IPR sobre PR, se utilizará el mismo clasificador en los experimentos en los mismos paradigmas.

Son los sistemas de aprendizaje computacional los que más se pueden beneficiar de las mejoras con el uso del IPR destacado anteriormente. Para elegir entre una gran variedad de algoritmos de aprendizaje computacional consideraremos solo aquellos capaces de proporcionar una explicación completa de las decisiones tomadas, con el objetivo de ofrecer al usuario una experiencia completa y que pueda comprender. Así, se ha elegido un sistema de aprendizaje basado en árboles de decisión. En (Illescas et al., 2011), descrito en el capítulo anterior, usamos un algoritmo RIPPER (Cohen, 1995) para solucionar el problema de desequilibrio en el número de instancias por cada clase, hay muchísimas más notas armónicas que no armónicas (89% de notas armónicas con nuestro corpus). Sin embargo, de acuerdo con los resultados de (Chuan and Chew, 2011), probamos el algoritmo de árboles de decisión C4.5 (Quinlan, 2014) dando ligeramente mejores resultados usando un esquema leave-one-out sobre un corpus de entrenamiento de los corales de Bach descrito anteriormente.

### 5.3 Definiciones

---

A las definiciones usadas para crear las características usadas para RIPPER, añadimos algunas más que serán usadas en el entorno interactivo:

**Definición 5.3.1**  $belongsToChord(x_i) \in \mathbb{B}$  es cierto si, dada la clase de altura de la nota  $pc(x_i)$ , en  $onset(x_i)$  hay un acorde sonando construido con un conjunto de notas  $\mathbf{C}$ , y  $pc(x_i) \in \mathbf{C}$

**Definición 5.3.2**  $belongsToKey(x_i) \in \mathbb{B}$  es cierto si, dada la clase de altura  $pc(x_i)$ , en  $onset(x_i)$  hay una tonalidad que usa la escala construida con la serie de notas  $\mathbf{S}$ , y  $pc(x_i) \in \mathbf{S}$

Las escalas usadas son: la diatónica mayor para las tonalidades mayores, y la unión de la menor ascendente, descendente y armónica.

**Definición 5.3.3**  $prevNoteMelodicTag(x_i) \in \mathcal{H}$  es la etiqueta melódica asignada a la nota anterior,  $h_{i-1}$ , sólo si ya ha sido analizada.

**Definición 5.3.4**  $nextNoteMelodicTag(x_i)$  es equivalente a la definición anterior pero referida a la nota siguiente,  $h_{i+1}$

La información sobre tonalidad y acorde usada en las definiciones que se acaban de presentar depende del orden en que el usuario realiza las distintas fases del análisis. Si en un momento dado alguna de esas informaciones no están disponibles, la característica quedará indefinida, y el clasificador no la podrá usar todavía. Durante la fase de interacción este tipo de información se hará disponible incrementalmente.

Este esquema de extracción de características usa una ventana de tamaño 3. En trabajos como (Meredith, 2006a) se usa una ventana mucho mayor para determinar el nombre de las notas (*pitch spelling*). Sin embargo, en nuestro caso, nuestro sistema es capaz de explicar la decisión usando sólo la nota predecesora y sucesora, basándonos en la armonía subyacente, tal y como se explica en la mayoría de libros de teoría musical.

#### 5.3.1. Reglas de restricción

El habernos centrado en las corales armonizadas de Bach, nos ha permitido añadir una serie de reglas manualmente para restringir las salidas del sistema quitando aquellas que son inválidas, como, por ejemplo, dos anticipaciones contiguas. Además, estas reglas permiten al sistema aprovechar información adicional que el usuario genera al usar el sistema como veremos posteriormente.

Como acabamos de comentar, el sistema evita salidas no válidas comprobando las siguientes condiciones. Sea  $x_i$  la nota a ser analizada,  $pc(x_i)$  su clase de altura,  $c$  el acorde sonando en  $onset(x_i)$ , y  $\mathbf{C}$  las clases de altura en el acorde  $c$ :

1.  $x_i$  no se puede etiquetar como H (nota real) si ataca en tiempo débil, es decir,  $instability(x_i) > meterNumerator(x_i)$ , y  $pc(x_i) \notin \mathbf{C}$ .

2.  $h_i = H$  siempre que  $pc(x_i) \in C$ .
3.  $x_i$  no se puede etiquetar como nota de paso (P) si  $h_{i-1} \in \{AP,S,AN,N\}$  (apoyatura, suspensión, anticipación o floreo).
4.  $x_i$  no se puede etiquetar como N si  $h_{i-1} \in \{AP,S,AN,P\}$ .
5.  $x_i$  no se puede etiquetar como  $\{A,AP,S\}$  si  $h_{i-1} \in \{AP,S,AN,N,P\}$ .

Estas reglas que tienen en cuenta información de tonalidad y acorde, o de notas de alrededor, están disponibles para el sistema por la interacción del usuario. El cálculo de la información y la tonalidad implicaría un proceso completo de análisis tonal, y este capítulo se centra sólo en la tarea del análisis melódico, el resto del proceso lo realiza el usuario manualmente.

### 5.4 Prototipo de aplicación

---

Con el fin de probar la validez del enfoque IPR para la tarea del análisis melódico en un escenario con usuarios reales, y para estudiar como reducir el esfuerzo de los usuarios usando un asistente, se ha desarrollado un prototipo interactivo utilizando JavaFX 8,<sup>2</sup> un framework de desarrollo de interfaces gráficas de usuario construido sobre el lenguaje Java.

La aplicación permite no sólo realizar un análisis melódico, sino también ayuda sobre los análisis tonal, acórdico y funcional, porque la identificación de acordes y el análisis melódico no se pueden hacer como tareas aisladas, sino que necesitan realizarse de manera coordinada. La razón es que la decisión de qué notas se deben incluir para formar un acorde depende de cuáles han sido etiquetadas como armónicas; pero para etiquetar una nota como armónica se debe predecir qué acorde será formado (así como otras consideraciones).

Con el fin de realizar el análisis, el prototipo tiene las siguientes características:

- Lee y escribe desde y hacia MusicXML. Los acordes se codifican utilizando los elementos del lenguaje correspondiente, el resto de análisis, tal como las funciones tonales tonalizaciones, etc., se codifica utilizando el elemento *Lyrics*.
- Lee desde el formato **\*\*kern** incluyendo las “spinas armónicas” (las spinas hacen referencia realmente a cada una de las voces)
- Renderiza la partitura visualmente permitiendo la selección de elementos individuales.
- Ayuda al usuario a elegir el acorde y la tonalidad más probable en cada momento.
- Permite la introducción y la edición por parte del usuario de todos los elementos del análisis tonal: etiquetas melódicas, acordes, cambio de tonalidad, tonalizaciones y dominantes secundarias.

---

<sup>2</sup><http://www.oracle.com/technetwork/es/java/javafx/overview/index.html>

- Registra todas las acciones del usuario para su posterior estudio.

Para comparar las acciones del usuario utilizando los tres enfoques considerados: manual, automático basado en PR y asistido-IPR, el usuario puede seleccionar el modo de operación en la aplicación.

### 5.4.1. Modo manual

No muy diferente a utilizar una hoja de papel y un lápiz, una forma de realizar un análisis utilizando el ordenador es usar un editor de partitura como Finale o MuseScore, añadiendo las etiquetas melódicas como la letra bajo de cada nota. Esta propuesta que adoptamos en la creación de nuestro primer conjunto de datos (Illescas et al., 2007) (Capítulo 3) es tediosa, y el esfuerzo requerido para realizar un trabajo, medido como el número de interacciones, es como mínimo igual al número de notas. Este método no se ha tenido en cuenta en esta experimentación.

El uso del prototipo en el modo manual permite al usuario introducir manualmente la etiqueta melódica de cada nota. Actúa como una herramienta de ayuda para anotar la tonalidad y acorde de la sonoridad seleccionada de manera asistida. Las únicas acciones de usuarios registradas serán aquellas relacionadas con el etiquetado melódico y descartaremos aquellas referidas al acorde y la tonalidad.

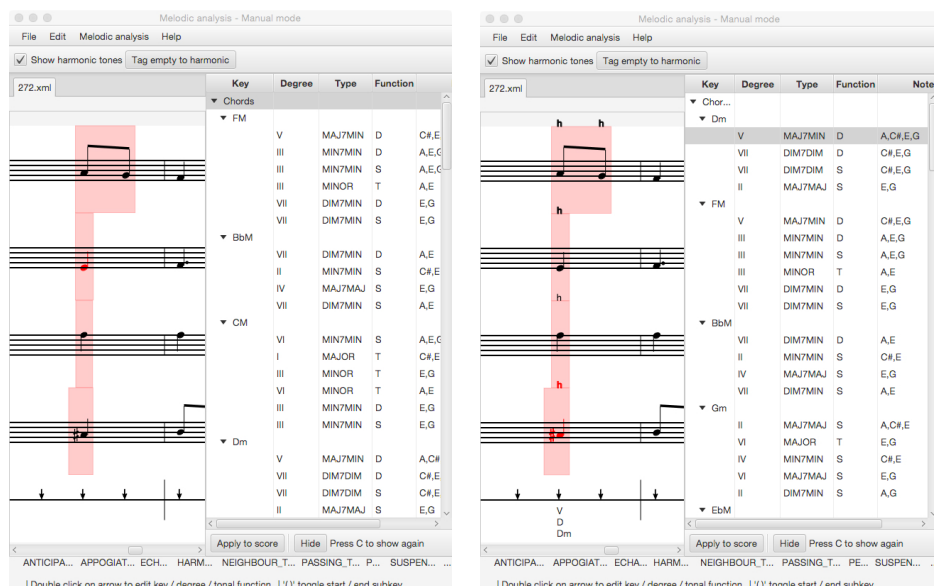
En un escenario típico, el usuario procede como sigue:

1. Se selecciona una nota. La sonoridad correspondiente es resaltada en consecuencia incluyendo todas las notas que están simultáneamente sonando en cualquier momento de la sonoridad seleccionada (Fig. 5.2a). Se muestra jerárquicamente una lista de posibles tonalidades con sus posibles acordes y funciones tonales. Más adelante se dan los detalles de como se construye esta lista.
2. Se selecciona un acorde de la lista de acordes y tonalidades válidas y se aplica a la sonoridad seleccionada (Fig. 5.2b). Si el usuario prefiere aplicar otro acorde y tonalidad no presente en la lista propuesta (tales como tonalizaciones o dominantes secundarias) eso se puede realizar utilizando un cuadro de diálogo como se muestra en la Figura 5.3. Una vez el contexto queda establecido, como una ayuda al usuario, las notas que no pertenecen al acorde activo son resaltadas.
3. Finalmente, usando un conjunto de combinaciones de teclas preestablecidas, el usuario selecciona la etiqueta melódica adecuada para cada nota. El sistema únicamente registra esta última acción porque es la única que corresponde estrictamente a la tarea del análisis melódico.

Se repite este proceso para cada nota de la obra musical. Nótese que el usuario puede desdecirse de una decisión y la misma nota podría ser etiquetada varias veces.

En muchas obras musicales, al menos en el periodo Barroco, casi todas las notas son armónicas no ornamentales esto implica que el etiquetado de notas sigue una distribución altamente desequilibrada en favor de la clase H. Con el fin de evitar al usuario un gran número de acciones innecesarias, el prototipo incluye un botón que etiqueta todas las

## 5.4. PROTOTIPO DE APLICACIÓN



(a) Tras seleccionar la nota del contraalto Mi, la sonoridad se resalta. La última tonalidad era Fa mayor.

(b) Aplicación del acorde seleccionado. Todas las notas que pertenecen al acorde se etiquetan como reales (H).

Figura 5.2: Sonoridad resaltada y aplicación del acorde y tonalidad seleccionados

notas no etiquetadas como armónicas (véase Fig. 5.4). esto permite al usuario etiquetar solo notas extrañas, reduciendo considerablemente el número de interacciones.

### Construcción de la lista de acordes y tonalidades

Las tonalidades válidas añadidas a la lista son aquellas cuya escala asociada incluye todas las notas en la sonoridad seleccionada.

Los acordes se escogen usando un enfoque basado en plantillas: considerando el conjunto de notas, se emparejan todas las combinaciones posibles de los grupos de al menos dos notas con la lista de tipos de acordes mostrados en el Cuadro 5.1. Finalmente, la lista de tonalidades es alineada (clasificada) usando el ordenamiento siguiente: la tonalidad actual primero (o el modo principal de la tonalidad actual según la armadura si no se encuentra ninguna tonalidad anterior), después la siguiente tonalidad arriba y abajo en el círculo de quintas y la relativa menor o mayor. El resto de tonalidades se ordenan de manera inversa, proporcionales a las distancias en el círculo de quintas. En la tonalidad menor, la relativa mayor se ubica en la segunda posición de la lista.

Dentro de cada tonalidad, los acordes se ordenan con los que tienen más notas en la sonoridad primero. Teniendo el mismo número de notas, aquellos conteniendo la raíz son ubicados en posiciones superiores, y cuando se comparan acordes que contienen la raíz y tienen el mismo número de notas, se ordenan las funciones tonales como: tonal, dominante y subdominante. En la Figura 5.2b se muestra un ejemplo.

## CAPÍTULO 5. ANÁLISIS MELÓDICO INTERACTIVO

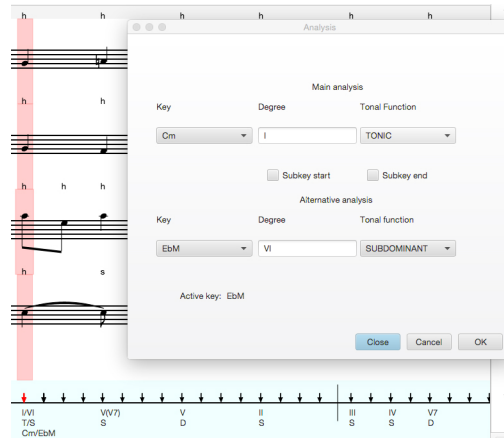


Figura 5.3: Diálogo que permite aplicar un acorde no presente en la lista de acordes propuesta. Usada para asignar tonalizaciones y dominantes secundarias.

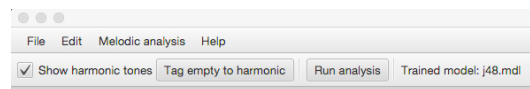


Figura 5.4: Botón que etiqueta como reales todas las notas no etiquetadas anteriormente.

### 5.4.2. Modo automático

El modo automático introducido anteriormente como “implementado por computador” por Maxwell (1984) y descrito bajo el paradigma de reconocimiento de patrones básicos (sección 4.1) el usuario procede utilizando este protocolo:

1. Primero el sistema analiza la partitura automáticamente, se ha embebido la implementación del algoritmo C4.5 (Quinlan, 2014) de Weka (Hall et al., 2009) y ha sido alimentado utilizando las características descritas en la Sección 4.1.1, excluyendo aquellas referidas a acordes y tonalidad (*belongsToChord* y *belongsToKey*) porque no están disponibles cuando la obra se analiza automáticamente por primera y única vez.
2. Todas las notas tienen ahora una etiqueta melódica, que puede ser correcta o no. A partir de ese punto, el usuario continúa exactamente como hemos explicado anteriormente en el modo manual, eligiendo acordes y tonalidades, y, en lugar de cambiar la etiqueta melódica para cada nota, solo cambiando aquellas etiquetas que el clasificador C4.5 ha clasificado mal (véase Fig. 5.5).

El sistema ha sido entrenado utilizando un conjunto inicial de corales armonizados de Bach etiquetados en la primera fase de este trabajo (véase la lista de obras en la Sección 3.6).



## 5.4. PROTOTIPO DE APLICACIÓN

Cuadro 5.1: Plantillas de acordes. Los semitonos del primer tono corresponden a los semitonos desde la tónica del acorde.

Tipo de acorde	Semitonos desde la nota anterior
Triada mayor	(4,3)
Triada menor	(3,4)
Triada aumentada	(4,4)
Triada disminuida	(3,3)
Mayor con séptima menor	(4,3,3)
Aumentado con séptima mayor	(4,4,3)
Disminuido con séptima menor	(3,3,4)
Disminuido con séptima disminuida	(3,3,3)
Séptima mayor con séptima mayor	(4,3,4)
Séptima menor con séptima menor	(3,4,3)

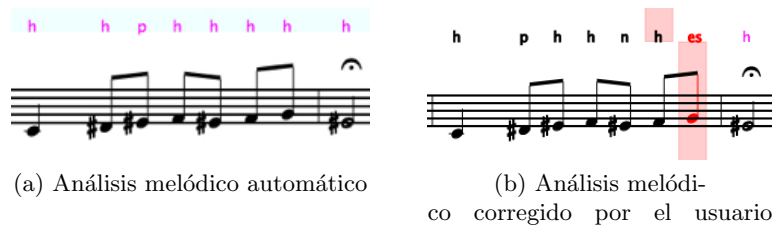


Figura 5.5: Resalte de la sonoridad y aplicación del acorde y tonalidad seleccionada.

### 5.4.3. Modo asistido

El modo asistido corresponde a la propuesta IPR introducida anteriormente, denominada por Maxwell (1984) como análisis “asistido por ordenador”. Ahora el sistema reacciona frente a todas las acciones del usuario. A continuación se describe el bucle de acciones:

1. Como en el modo manual, el usuario selecciona una nota y la sonoridad correspondiente queda resaltada. El usuario identifica y asigna una tonalidad y acorde.
2. El prototipo realiza un análisis melódico usando el clasificador C4.5. Ahora las características *belongsToChord* y *belongsToKey* ya tienen un valor para todas las notas de la sonoridad seleccionada y siguientes. Es más, todas las restricciones en las reglas descritas en la Sección 5.3.1 se pueden aplicar ahora.
3. De la misma forma que en el modo automático, el usuario puede corregir (realimentación) cualquier etiqueta de análisis melódico, que desencadena la

## CAPÍTULO 5. ANÁLISIS MELÓDICO INTERACTIVO

---

propagación de la decisión a todas las notas con las mismas características, y ejecuta de nuevo el clasificador C4.5, ahora reentrenado con la nueva muestra corregida. Una etiqueta corregida por usuario no es modificada nunca por ninguna nueva decisión del clasificador.

4. Se repite el proceso hasta que todas las notas están etiquetadas melódicamente.

Este proceso no es una mera repetición del proceso en el modo automático para cada nota, tiene varias implicaciones importantes:

- Las notas etiquetadas como extrañas no se utilizan para construir la lista de acordes válidos en el panel de ayuda. Este método acota la búsqueda del acorde deseado, pero también fuerza al usuario a etiquetar como armónicas las notas que el sistema había confundido por extrañas. Puede parecer que la identificación correcta de acordes y tonalidades ralentiza el etiquetado melódico. Sin embargo, dado que las características *belongsToChord* y *belongsToKey* utiliza información de tonalidad, el clasificador tiene ahora más información sobre el contexto armónico tras cada interacción, lo que potencia que el proceso de etiquetado se acelere.
- El cambio de la etiqueta melódica afecta a las notas de contiguas cuyas características pueden ser modificadas por las reglas de restricción tras la interacción del usuario, llevando a una corrección de un etiquetado posiblemente incorrecto.

Este proceso no se puede hacer secuencialmente de izquierda a derecha porque el usuario podría proceder de una manera tipo “*island-growing*”, primero localizando los centros tonales para después completar tanto hacia adelante, como hacia atrás.

### 5.4.4. Análisis de la interacción del usuario

El prototipo registra cada acción llevada a cabo. En este estudio, sólo las acciones relacionadas con el propio análisis melódico se han tenido en cuenta. Para no bloquear la interacción del usuario en ningún momento se ha utilizado un sistema de Logging de Java personalizado para exportar el tipo de información que se muestra en el Cuadro 5.2, imprimiendo las acciones del usuario a un fichero utilizando un proceso separado al del Interface. De ese fichero se extraen los tiempos y número de interacciones del usuario. El sistema guarda información de sesión con el fin de que el usuario pueda cerrar el prototipo y continuar el análisis en cualquier momento posterior.

## 5.5 Experimentos

---

El sistema ha sido abordado usando algunas de las corales de Bach, codificadas usando MusicXML. Estas obras han sido ampliamente usadas como un *ground truth* escolástico de armonía tonal, como se ha comentado en la revisión del estado de la cuestión. Además, contiene líneas monódicas para cada voz lo que facilita la construcción

Cuadro 5.2: Ejemplo de entradas de registro

Action time stamp	Session time stamp	Action type	Action
		...	
1417009922812	1417009922796	actionloggersystem	started
1417010341734	1417009922796	MELODICANALYSIS.CHANGE	PASSING_TONE
1417010390390	1417009922796	MELODICANALYSIS.CHANGE	PASSING_TONE
1417010550375	1417009922796	MELODICANALYSIS.CHANGE	SUSPENSION
1417010665140	1417009922796	MELODICANALYSIS.CHANGE	HARMONIC
		...	

de las características del clasificador. Algunas de estas corales son las mismas que hemos usado en el capítulo anterior.

Para la fase de entrenamiento, se han usado las siguientes corales armonizadas: números de catálogo BWV 89.6, 148.6, 253, 272, 274, 275, 280, 437, 438.

Para el test, se han usado las siguientes: números de catálogo BWV 255, 256, 257, 259, 260, 281, 282, 285, 286, 287, 288, 290, 292, 293, 294, 295, 296, 420, 421, 423, 424, 426, 427, 429, 431.

De éstas, las corales BWV 257, 260, 420 han sido analizadas por varios estudiantes, de forma que en total se han usado 30 obras, 25 distintas, para la fase de test.

### 5.5.1. Prueba de concepto: capacidad para aprender interactivamente

Con el fin de comprobar la capacidad del sistema interactivo de aprender incrementalmente a partir de las interacciones del usuario, se ha realizado una simulación en la que el sistema recibe un trabajo musical cuyas notas han sido etiquetadas manualmente con sus correspondientes etiquetas de análisis melódico, y simula la acción del usuario como sigue:

1. La obra se analiza automáticamente usando un clasificador, que es posible que no esté entrenado. Tras este paso, están disponibles tanto la etiqueta correcta de cada nota a partir del análisis manual como la etiqueta, asignada por el clasificador.
2. El sistema interactivo continúa ahora como lo haría un humano: busca un error en el análisis (aleatoriamente para simular la acción real del usuario que avanza y retrocede en la obra) y entonces reemplaza la etiqueta incorrecta (asignada por el clasificador) por la etiqueta correcta (que había sido obtenida del análisis manual previo de referencia).
3. Esta interacción desencadena el bucle del reconocimiento de patrones interactivo, es decir, la decisión proporcionada en la interacción se propaga para todas las

## CAPÍTULO 5. ANÁLISIS MELÓDICO INTERACTIVO

---

notas que no hubiesen sido previamente corregidas y el modelo del clasificador se actualiza en consecuencia incluyendo esta nueva muestra.

4. El proceso se repite hasta que no quedan más errores. El número de cambios realizados, que es igual al número de veces que se ha ejecutado el bucle, es el valor de evaluación del rendimiento del sistema.

Utilizando esta configuración, se ha usado la serie completa de las corales de Bach analizadas. Se ha alimentado el sistema con el conjunto de corales, comenzando con un sistema C4.5 no entrenado que aprende tras cada interacción (simulada) del usuario sobre la pieza musical. Dado que no todas las corales tienen el mismo nivel de complejidad, el orden de presentación puede afectar a la evolución de la tasa de error. Para evitar cualquier sesgo debido a este hecho, se ha repetido el proceso 100 veces con diferentes ordenaciones de las obras, La Figura 5.6 muestra cómo la tasa de error disminuye conforme el sistema analiza más y más obras, lo que evidencia que el sistema es capaz de aprender a partir de la interacción del usuario.

Considerando la posibilidad de usar un árbol de decisión capaz de actualizar el modelo de manera incremental, sin tener que reentrenar cada vez que el usuario añade una retroalimentación, se ha realizado la simulación también con un árbol de decisión Hoeffding (VFDT) (Hulten et al., 2001). Sin embargo, los resultados obtenidos, tanto para el enfoque PR clásico como para la configuración que acabamos de exponer, han sido peores que los obtenidos usando el clasificador C4.5. Además, la mejora en rendimiento del aprendizaje incremental del VFDT comparado con el reentrenamiento completo con el C4.5 no ha sido perceptible.

### 5.5.2. Configuración experimental y datos

Para poner a prueba el prototipo en un entorno educativo realista, se ha seguido el siguiente proceso:

1. El autor ha etiquetado manualmente el conjunto de aprendizaje.
2. Estudiantes de diversas especialidades del grado superior de música han analizado el conjunto de prueba usando los tres modos del prototipo: manual, automático e interactivo. Se ha evitado el análisis del mismo trabajo en diversos modos por el mismo estudiante para evitar que el alumno disponga de información previamente aprendida al cambiar el modo.
3. En todos los análisis, el sistema ha sido iniciado usando el mismo modelo entrenado.

### 5.5.3. Resultados

La Figura 5.7 muestra los resultados del análisis melódico usando el conjunto de test descrito anteriormente. El porcentaje de menos de un 15% de notas extrañas (NHT) de media, da la idea del número mínimo de interacciones que el usuario tiene que hacer cuando pulsa primero el botón “Tag all as harmonic tones” y etiqueta después sólo las

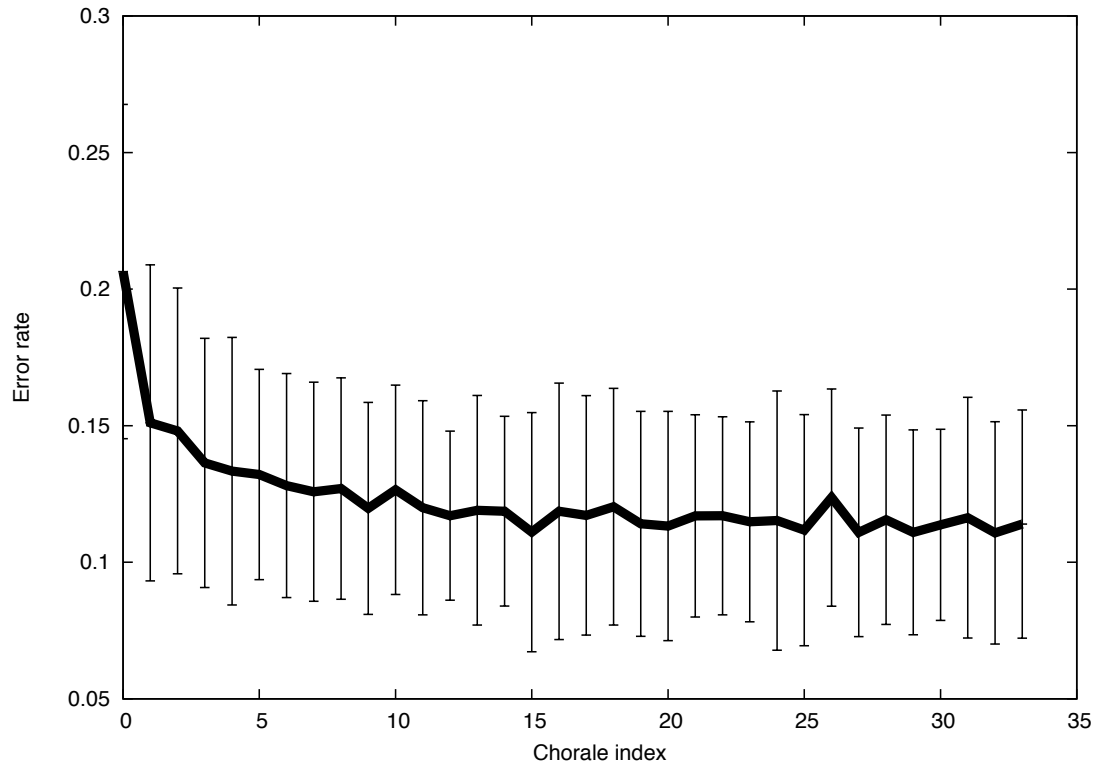


Figura 5.6: Evolución de la tasa de error conforme el usuario analiza obras. El eje  $x$  representa el orden de la lista de obras en que ésta se analiza. La gráfica muestra la media (línea gruesa) del resultado de 100 ordenaciones distintas del corpus de entrada. Se muestra también la desviación típica. La tasa de error se mide como el número de interacciones requeridas para corregir una pieza dividido por el número de notas que contiene.

notas extrañas asumiendo que el usuario no cambia de opinión nunca y no etiqueta una nota dos veces.

Los resultados muestran que es el paradigma IPR es el que obtiene los mejores resultados. La gráfica de la Figura 5.7 demuestra lo que cabía esperar. Los resultados con el enfoque manual son peores que el número mínimo teórico de interacciones, que se esperaba que fuese igual al número de notas extrañas más uno por la acción de pulsar el botón de etiquetar todo como real (es decir, aproximadamente un 15%). Esto es debido al hecho de que el usuario, al corregir el problema de manera heurística, prueba varias posibles soluciones y etiqueta la misma nota varias veces con distintas opciones.

El enfoque automático, es decir, el PR clásico, aligera el esfuerzo del usuario, que aprovecha algunas de las notas bien analizadas, lo que, a su vez, ayuda en la selección correcta de acordes y tonalidades acotando mas búsqueda heurística de la solución. Finalmente, en el sistema IPR propuesto se aprovechan todas las ventajas del PR, y son

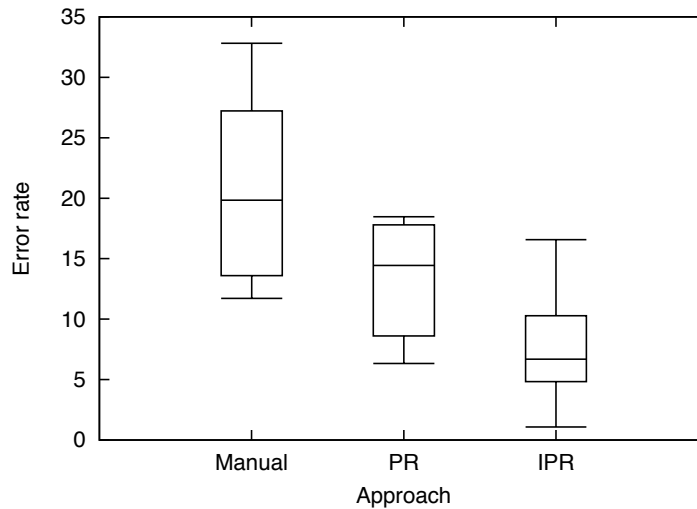


Figura 5.7: Resultados en términos del número de interacciones necesarias para solucionar el análisis melódico. Los porcentajes se obtienen como el número de interacción dividido por el número de notas

mejoradas por el uso de la retroalimentación del usuario, que por un parte, enriquece las características que se pasan de entrada al clasificador tras cada interacción, y por otra, reentrena el modelo incorporando los análisis correctos con nuevos ejemplos l conjunto de entrenamiento que se encontraran muy probablemente en el mismo trabajo varias veces, reduciendo así el número de interacciones requeridas para obtener el análisis final correcto.

Es importante destacar que el enfoque IPR en esta tarea tiene una ventaja competitiva sobre el PR: la información armónica (contexto tonal, acordes) no se puede analizar antes de que se haga el análisis melódico, porque cada uno de los tres aspectos depende de los otros dos. Por tanto, el enfoque PR no tiene la posibilidad de usar la información armónica que el usuario proporciona en su uso interactivo de la herramienta.

En la configuración actual del experimento, la mejora más importante a partir de la retroalimentación del usuario viene del uso de información contextual añadida tras cada interacción no disponible en el paradigma PR. La propagación, que es equivalente a incorporar nuevas muestras al modelo que a su vez podrían ser usadas para solucionar situaciones similares en el futuro, constituye la siguiente mejora. Finalmente, los experimentos no han aprovechado completamente todas las ventajas posibles inherentes al entrenamiento online y el ajuste del modelo por el hecho de que el modelo no se guarda tras todas las interacciones realizadas con una obra, sino que se reinicia tras cada experimento para poder comparar con los enfoques manual y PR en condiciones similares.

---

**5.6 Conclusiones**

---

El análisis tonal de obras musicales en un entorno computacional es una tarea que fue planteada ya en la década de los años sesenta del pasado siglo. Se han propuesto muchos enfoques distintos tanto desde una aproximación basada en los datos, como desde aquella construida desde el conocimiento de los expertos. A pesar de que diferentes autores han presentado resultados interesantes, hoy en día la solución al problema está aún sin resolver.

En este capítulo hemos aplicado un enfoque distinto, basado en la idea de Reconocimiento de Formas Interactivo (IPR), que centra su acción en intentar reducir el esfuerzo final que el usuario debe realizar, en lugar de minimizar los errores inicialmente cometidos por el sistema al realizar un análisis totalmente automático.

Usando técnicas bien conocidas del paradigma de reconocimiento formas clásico, el sistema IPR mejora su rendimiento incorporando la retroalimentación del usuario en el modelo tras cada interacción, lo que ayuda al sistema a ser refinado conforme el usuario trabaja con él.

Para explorar la idoneidad del método, se ha aplicado este enfoque IPR a una parte del análisis tonal: el análisis melódico, dejando aparte el cálculo de la tonalidad y los acordes, que debe realizarse manualmente. La propuesta ha sido evaluada usando un prototipo de aplicación que, además de realizar este análisis melódico usando IPR, ayuda al usuario a anotar el contexto tonal de la obra.

Usando un corpus ampliamente usado: parte de las corales armonizados de Bach, se ha probado que el paradigma IPR es un enfoque prometedor para obtener finalmente una solución satisfactoria al problema del análisis tonal asistido por ordenador desde el punto de vista del usuario.

# 6

## Conclusiones, contribuciones y trabajo futuro

En este trabajo se ha llevado a cabo el repaso de la historia del análisis musical y la inmensa variedad de metodologías propuestas por diversos autores a lo largo del tiempo, cuyo objetivo general ha sido, bien servir de guía para la composición, bien como forma de desentrañar la complejidad de las obras musicales, y en cualquier caso, servir como medio de formación de músicos.

Hemos llegado a un tiempo en el que la presencia de las tecnologías afectan el modo en que se realizan muchas tareas, y cómo no, la práctica musical. Así, nos planteábamos investigar hasta qué punto era posible que un ordenador realizase análisis musicales y, en su caso, en qué condiciones o bajo qué requerimientos técnicos y funcionales.

En concreto, nuestro interés se localizó en investigar hasta dónde se podía llegar en la realización de análisis armónicos, contrapuntísticos, tonales y funcionales, sabiendo, de entrada, que algunos de los conocimientos que pone en juego el analista en su trabajo son difícilmente computables. Así, adjetivos como *bastante* o *suficiente*, o adverbios como *mucho* son frecuentemente utilizados cuando el analista explicita las reglas que usa en su trabajo.

Otra restricción a priori en un sistema como el planteado es que no puede comportarse como una caja negra: un sistema que mágicamente obtenga resultados iguales a los que realiza un experto humano no es útil ni aceptable por el músico, pues sin una explicación de las reglas y mecanismos utilizados, no puede estar seguro de su funcionamiento universal. Por ello, cualquier sistema basado en técnicas de inteligencia artificial para realizar esta tarea debía hacer explícitas las reglas usadas.

A lo largo del desarrollo de este trabajo se ha ido demostrando que sí es posible crear ese tipo de sistema a través de una solución que, mediante la integración del usuario en la tarea, se pueda adaptar a muchos de los planteamientos que hemos revisado en la breve historia del análisis armónico tonal.

La explicación de los mecanismos utilizados para resolver el análisis y la conveniencia de la participación del usuario para lograr el mejor rendimiento del sistema, hacen indicado el uso de una herramienta como ésta en el aula, como medio de aprendizaje y apoyo al profesor.



## **CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES, CONTRIBUCIONES Y TRABAJO FUTURO**

---

### **Evolución temporal**

El desarrollo de esta tesis ha llevado diez años, en los que el proceso de análisis musico-computacional ha sufrido muchas evoluciones. A continuación se expone, de forma sumaria, dichas etapas en la evolución del presente trabajo.

1. La primera versión del sistema estaba basado en el uso de un conjunto de reglas formales que, en principio, resultaban en un número excesivo y realmente poseían una complejidad estructural muy difícil de manejar.
2. A partir de este primer sistema de reglas, realmente muy complicado, se redujeron esas reglas notablemente, dejándolas en un conjunto de cuarenta reglas.
3. De esas cuarenta reglas se realizó un cambio radical del procedimiento analítico y se desarrollaron veintisiete reglas, las cuales funcionaban mucho mejor que los sistemas de reglas anteriores.
4. Posteriormente, el sistema de análisis automático fue modificado, recurriendo a las técnicas de inferencia de reglas mediante aprendizaje computacional, utilizando dos modelos: por un lado el algoritmo de inferencia de reglas RIPPER y por otro programación lógica inductiva (ILP). Estos sistemas fueron capaces de mejorar el rendimiento de los sistemas basados en reglas construidas manualmente. Sin embargo, aún no eran suficientemente buenos para usarlos con confianza en una tarea real de análisis.
5. Finalmente, se cambió el objetivo: en vez de buscar un sistema autónomo, se planteó un sistema que incorporara al usuario en la solución de la tarea, procurando minimizar el esfuerzo necesario por parte del mismo para conseguir un análisis correcto. Este enfoque permitía que el sistema se pudiera amoldar a las peticiones y características de cada usuario, pudiendo aprender de las correcciones que el mismo realice al sistema. Ello era posible bajo la aplicación del paradigma del reconocimiento de patrones interactivo.

Queda patente el proceso de cambio sufrido por este trabajo durante estos diez años de investigación y cómo, lo que comenzó con un simple sistema de reglas casi incontrolable, se ha ido convirtiendo en un proceso riguroso y potente de aprendizaje automático interactivo.

Aunque el párrafo anterior sintetiza el trabajo realizado en los últimos diez años, la tarea realizada ha sido ardua y complicada, y prueba de ello es que, al menos a nuestro entender, no existe en la literatura científica otro trabajo capaz realizar el análisis de una partitura tonal de manera comparable a cómo se lleva a cabo en este trabajo.

### **Uso del sistema en el entorno pedagógico**

Dada la incorporación del analista al proceso de solución del problema, se hizo imprescindible la concepción de una *interface* gráfica, para que el usuario pueda analizar

---

una partitura con el apoyo del ordenador. Ya que el sistema que se ha implementado al final de este trabajo no es autónomo, no es procedente determinar su calidad en términos de lo bien o mal que va el sistema ya que éste siempre llega a una solución correcta, mediante la interacción del usuario.

Entonces, como conclusiones generales, más de dar unas valoraciones cualitativas y cuantitativas del sistema (resultados que se han dado en las conclusiones parciales de los capítulos correspondientes) lo conveniente ahora es indicar las “sensaciones” de los alumnos que han usado el sistema. Las experiencias fueron protagonizadas por los alumnos del Conservatorio Superior de Música de Murcia “Manuel Massotti Littel”.

Para la gran mayoría de los alumnos, esta experiencia les ha sido muy grata. El hecho de que el ordenador realice un análisis tonal de una partitura les llenó de entusiasmo, hasta tal punto que son muchos los que, a día de hoy, están más que impacientes por poder disponer del *software* para un uso totalmente real y funcional, por lo que para un trabajo futuro se plantea la posibilidad de convertir el prototipo de investigación desarrollado, en una aplicación pedagógica de ayuda, tanto para el alumnado y el profesorado, como para cualquier músico o aficionado. Además para realizar una buena interpretación de una obra, se necesita hacer un buen análisis de la partitura con lo que la implementación del sistema también puede servir de ayuda para todos aquellos que se interesen realmente por una interpretación consciente de obras musicales.

### **Otros usos**

El uso del sistema de aprendizaje evita la arbitrariedad o subjetividad de un conjunto de valores dados por un experto humano para construir las reglas del análisis y, además, permite que el sistema adapte su rendimiento a diferentes géneros de la música. Además, también puede servir como herramienta para otros aspectos de la música por computador, como por ejemplo, la composición asistida, la extracción y recuperación de información musical basada en elementos analíticos como por ejemplo la tonalidad, la melodía, la secuencia rítmica, etc., así como para sistemas de segmentación de la melodía, detección de obras semejantes, etc.

### **Multidisciplinariedad**

Haber conseguido crear el sistema de análisis asistido por ordenador que se planteaba en la hipótesis de este trabajo ha sido posible, no sólo gracias a la utilización de las técnicas de inteligencia artificial y reconocimiento de formas correctas, sino a través de un factor clave: la realización por un equipo multidisciplinar del área de los lenguajes informáticos y la música. En este trabajo cada uno ha aportado su especialización y además se ha conseguido que cada una de esas especializaciones se “entiendan” entre sí. Al igual que ocurre con un equipo deportivo, en donde cada jugador tiene que tener unas características propias del puesto que ocupa en el equipo, siendo tan importante la velocidad de los extremos, como la visión del centrocampista como los reflejos del portero, un sólo jugador por muy bueno que sea de delantero, centrocampista y de portero, si es él solo, nunca va a superar a un equipo que esté mucho más compensado. Algo parecido

## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES, CONTRIBUCIONES Y TRABAJO FUTURO

---

puede haber sucedido en este caso, la compensación de todos y cada uno de los elementos que forman el equipo (las características propias de cada uno de sus miembros) ha sido lo que ha determinado la obtención de este resultado.

### Líneas de trabajo futuro

El sistema queda en un estado que podríamos considerar como punto de partida a uno muchísimo más ambicioso. Varias líneas de trabajo se abren a partir de ahora. Hemos probado el sistema usando varias obras no barrocas para coro. En concreto: “Divertimento en Re” de Wolfgang A. Mozart, K.136, “Der Traurige Jäger”, Op. 75, nº 3 de Robert Schumann, “En Etsi Valtaa Loistoa” de Jean Sibelius y, finalmente, la transcripción para coro de la canción “Black Bird” de The Beatles. El sistema ha dado una respuesta aceptable que creemos podría mejorar con más ejemplos para el entrenamiento en esos estilos, lo que nos lleva a planificar una ampliación de éste a distintos géneros y épocas de la música. Es posible que haya que remodelar ciertas partes del sistema, como la construcción de acordes, para poder trabajar con enfoques musicales que no usan sucesiones de terceras y quintas.

Estamos seguros que es posible afinar más los clasificadores, que valen como punto de partida del analizador interactivo, mejorando las características que usan, quizás ampliando el contexto usado para poder detectar mejor retardos y suspensiones. Debería introducirse algún sistema de clasificación de Fux y *Cambiata*.

Actualmente el sistema sólo emite la regla aplicada cuando utilizamos como base el algoritmo RIPPER. Sólo es cuestión de implementación que éste muestre las reglas usadas cuando el clasificador es el c4.5.

Finalmente, y como línea de trabajo más importante, queda aplicar el sistema de reconocimiento de patrones interactivo al resto de análisis: acórdico, funcional y de tonalidad, integrando la realimentación entre estas dimensiones y el melódico.

# A

## Anexo I

### A.1 Coral 25 analizado

---

Ejemplo de análisis mediante el sistema automático.

El análisis contiene el análisis para cada pentagrama con:

- *Tag*: análisis melódico, siendo uno de éstos:
  - H** Nota real (*harmonic*)
  - N** Nota extraña, bordadura (*neighbour tone*)
  - P** Nota extraña de paso (*passing tone*)
  - S** Nota extraña, retardo (*suspension*)
  - A** Nota extraña, apoyatura (*appoggiatura*)
- *Confidence*: confianza del análisis con uno de los valores:
  - h** Alto (*high*)
  - m** Medio (*medium*)
  - l** Bajo (*low*)
- *Conflict?*: el valor *multiple* indica si hay varias reglas que lo puedan analizar
- *Rules*: reglas que dan el análisis precedidas de la etiqueta melódica.

Se ha añadido un pentagrama adicional con los acordes encontrados, empleando la duración mínima en cada compás. Esos acordes van acompañados de un índice numérico para identificarlo, la función tonal, el grado y la tonalidad en el caso de que en el acorde cambie ésta.

# coral n25 cant 188

[Composer]

S

Tag:H  
Confidence:h  
Conflict?..  
Rules:H(RQ1.1)

c  
multiple  
N(RQ1.2)  
H(RQ1.1)

c  
multiple  
N(RQ3.6)  
H(RQ3.1.1.n2)  
H(RQ3.1.1.p2)

H  
multiple  
H(RQ3.1.1.n2)  
H(RQ3.1.1.p2)

A

H  
h  
H(RQ1.1)

H  
h  
H(RQ1.1)

H  
h  
H(RQ3.1.n)

H  
multiple  
H(RQ4.1.p)  
H(RQ3.1.1.n2)  
H(RQ3.1.1.p)

T

H  
h  
H(RQ1.1)

c  
multiple  
N(RQ1.2)  
H(RQ1.1)

H  
m  
H(RQ3.1.1.p2)

H  
m  
H(RQ3.1.1.n2)

B

H  
h  
H(RQ1.1)

c  
multiple  
N(RQ1.2)  
H(RQ1.1)

H  
N  
m  
multiple  
H(RS P N)  
H(RS NT)  
H(RS T)

H  
multiple  
H(RQ3.1.1.n2)  
H(RQ3.1.1.p1)

Analysis

I  
T  
0  
Am

I  
T  
4

I  
T  
5

V  
D  
6

V  
D  
7

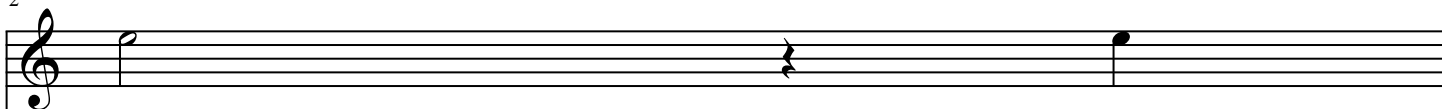
I  
T  
8

I  
T  
9

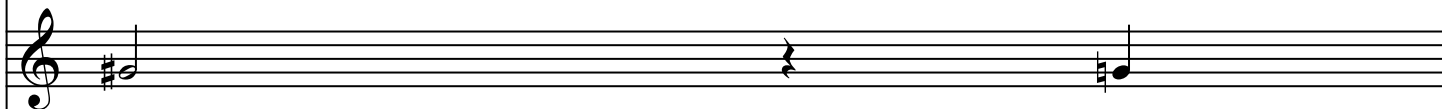
IV  
S  
10

IV  
S  
11

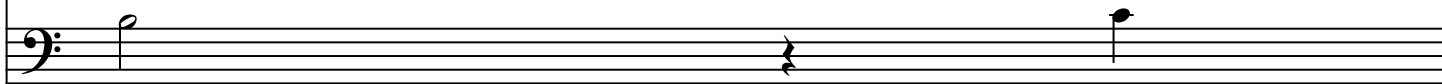
2



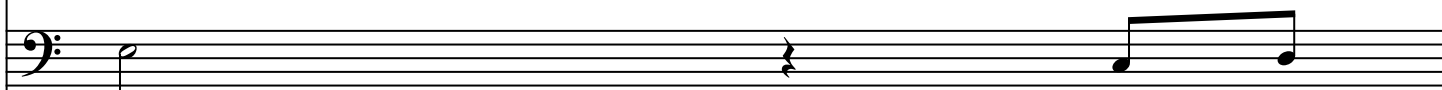
H  
h  
H(RL1.1)



H  
h  
H(RL1.1)

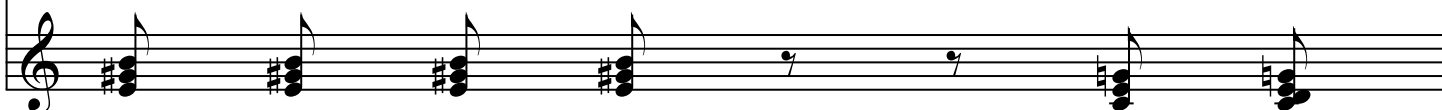


H  
h  
H(RL1.1)



H  
h  
H(RL1.1)

H N  
m m  
multiple  
H(RS P1.1)N(RS NT)  
H(RS T)\_\_\_\_\_



V  
D  
12

V  
D  
13

V  
D  
14

V  
D  
15

III  
T  
18

III  
S  
19

3

c  
 .  
 multiple  
 N(RQ1.2)  
 H(RQ1.1)

c  
 .  
 multiple  
 N(RQ3.6)  
 H(RQ3.1.1.n2)  
 H(RQ3.1.1.p2)

H  
 .  
 multiple  
 H(RQ3.1.1.p2)  
 H(RQ3.1.n)

c  
 .  
 multiple  
 N(RL1.3s)  
 H(RS P1.1)  
 H(RS T)

N  
 m  
 N(RS NT)

c  
 .  
 multiple  
 N(RL1.3s)  
 H(RS P1.1)  
 H(RS T)

N  
 m  
 N(RS NT)

H  
 .  
 multiple  
 H(RS P1.1)  
 H(RS T)

N  
 m  
 N(RS NT)

c  
 .  
 multiple  
 N(RQ1.2)  
 H(RQ1.1)

H  
 .  
 multiple  
 H(RS P1.2)  
 H(RS P1.1)  
 H(RS T)

c  
 .  
 multiple  
 H(RS P1.1)  
 N(RS NT)

H  
 m  
 H(RQ3.1.1.n2)

H  
 .  
 multiple  
 H(RQ3.1.1.n2)  
 H(RQ3.1.p2)

H  
 .  
 multiple  
 H(RS P1.1)  
 H(RS T)

N  
 m  
 N(RS NT)

H  
 .  
 multiple  
 H(RQ3.1.1.p2)  
 H(RQ3.1.n)

H  
 .  
 multiple  
 H(RQ4.1.p)  
 H(RQ3.1.1.n2)  
 H(RQ3.1.p)

III  
 T  
 20

VI  
 S  
 21

VII  
 D  
 22

V  
 D  
 23

I  
 T  
 24

I  
 T  
 25

VII  
 D  
 26

IV  
 S  
 27

H h H m c H m H m H m  
 H(RL1.1) H(RQ3.1.1.n2) multiple N(RQ1.2) H(RQ3.1.1.p2) H(RQ3.1.1.n2)  
 H(RQ1.1)

H h H m c H m H m  
 H(RL1.1) H(RQ3.1.1.n2) multiple N(RQ1.2) H(RQ3.1.1.n2) H(RQ3.1.1.p2)  
 H(RQ1.1)

H h c H m  
 H(RL1.1) multiple N(RQ1.2) H(RQ3.1.1.p2)  
 H(RQ1.1)

H h H h H N m H N  
 H(RL1.1) H(RQ3.1.n) H(RQ1.1) multiple H(RSN(RS)NT) H(RSN(RS)NT)  
 H(RS T) H(RS T)

V D 28 V D 29 V D 31 I T 32 I T 33 VII S 34 VII S 35 III T 36 III S 37 I T 38 I T 39



6

H  
h  
H(RL1.1)

H  
m  
H(RQ3.1.1.p2)

H  
h  
H(RQ3.1.n)

c  
multiple  
N(RQ1.2)  
H(RQ1.1)

H  
multiple  
H(RQ3.1.2.n2)  
H(RQ3.1.2.p2)  
H(RQ3.1.1.n2)

c  
multiple  
N(RQ1.2)  
H(RQ1.1)

c  
multiple  
N(RQ3.6)  
H(RQ3.1.1.n2)  
H(RQ3.1.1.p2)

H  
multiple  
H(RQ3.1.1.n1)  
H(RQ3.1.1.p2)

c  
multiple  
N(RQ1.2)  
H(RQ1.1)

H  
h  
H(RQ2.1.2)

H  
multiple  
H(RQ3.1.n)  
H(RQ3.1.p)

H  
multiple  
H(RQ4.1.p)  
H(RQ3.1.1.n2)  
H(RQ3.1.p)

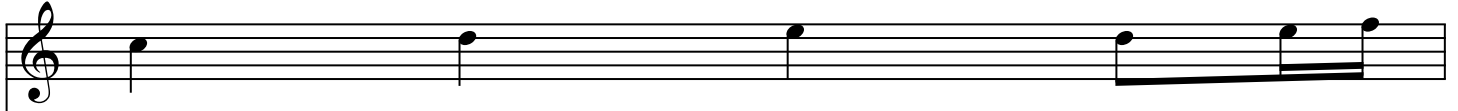
IV  
S  
40

VII  
S  
41

III  
T  
42

V  
D  
43

7



H \_\_\_\_\_  
h \_\_\_\_\_  
H(RQ1.1) \_\_\_\_\_

c  
.  
multiple  
N(RQ3.6)  
H(RQ3.1.1.n1)  
H(RQ3.1.1.p2)

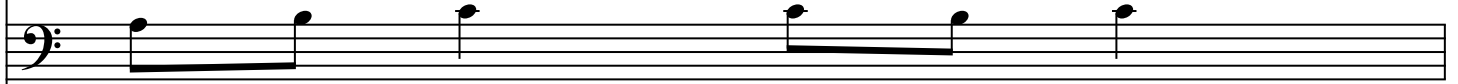
H            N    N  
              m    m  
.  
multiple  
H(RS P1.1)N(RS NT)N(RS NT)  
H(RS T) \_\_\_\_\_



H \_\_\_\_\_  
h \_\_\_\_\_  
H(RQ1.1) \_\_\_\_\_

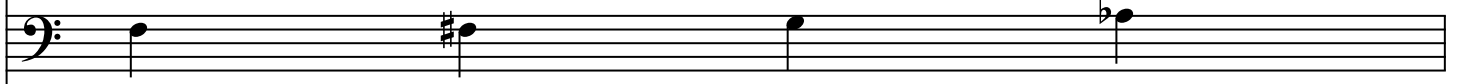
c  
.  
multiple  
N(RQ3.6)  
H(RQ3.1.1.n2)  
H(RQ3.1.1.p2)

H  
.  
multiple  
H(RQ3.1.1.n2)  
H(RQ3.1.1.p2)



H            N \_\_\_\_\_  
.  
multiple        m \_\_\_\_\_  
H(RS P1.1)    N(RS NT) \_\_\_\_\_  
H(RS T) \_\_\_\_\_

c            N            H  
              m            h  
.  
multiple  
N(RL1.3s)N(RS NT)    H(RQ3.1.1.p1)  
H(RS P1.1) \_\_\_\_\_  
H(RS T) \_\_\_\_\_



H \_\_\_\_\_  
h \_\_\_\_\_  
H(RQ1.1) \_\_\_\_\_

c  
.  
multiple  
N(RQ3.6)  
H(RQ3.1.1.n2)  
H(RQ3.1.1.p2)

H  
.  
multiple  
H(RQ3.1.1.n1)  
H(RQ3.1.1.p2)



VI    VI    II    II    IV    IV    IV    IV    III    III    V    V    VI    VI    I  
T    T    S    S    S    S    S    S    T    T    T    T    S    S    T    T  
44   45   46   47   48   49   50   51   52   53   54   55   56   57   58   59  
Fm

8



c  
 . multiple  
 N(RQ1.2)  
 H(RQ1.1)

H N H  
 . multiple  
 H(RS P1.1) N(RS NT) H(RQ3.1.n)  
 H(RS T)

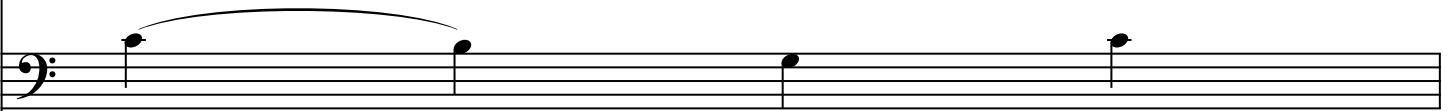
H  
 . multiple  
 H(RQ4.1.p)  
 H(RQ3.1.n)  
 H(RQ3.1.p)



c  
 . multiple  
 N(RQ1.2)  
 H(RQ1.1)

H N H  
 . multiple  
 H(RS P1.1) N(RS NT) H(RQ3.1.n)  
 H(RS T)

H  
 . multiple  
 H(RQ4.1.p)  
 H(RQ3.1.p)

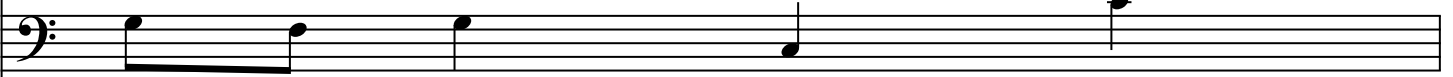


c  
 . multiple  
 N(RQ1.2)  
 H(RQ1.1)

H h  
 H(RQ2.1.2)

H  
 . multiple  
 H(RQ3.1.n)  
 H(RQ3.1.p)

H  
 . multiple  
 H(RQ4.1.p)  
 H(RQ3.1.1.n2)  
 H(RQ3.1.p)



H N H  
 . multiple  
 H(RS P1.1) N(RS NT) H(RQ2.1.2)  
 H(RS T)

H h  
 H(RQ3.1.p)

H m  
 H(RQ3.1.1.n2)



V  
D  
60

I  
T  
61

V  
D  
62  
CM

I  
T  
63

I  
T  
64

I  
T  
65

I  
T  
66

I  
T  
67

9

H h H h H m  
 H(RQ1.1) H(RQ2.1.1) H(RQ3.1.1.n2)

H h c N c H  
 h m m m m  
 H(RQ1.1) multiple N(RL1.3w)N(RS NT) multiple N(RQ3.6) H(RQ3.1.1.p2)  
 H(RS P1.1) H(RS T) H(RQ3.1.1.n2) H(RQ3.1.1.p1)

c c N H N  
 multiple multiple multiple  
 N(RQ1.2) N(RL1.3s)N(RS NT) H(RS P1.1)N(RS NT)  
 H(RQ1.1) H(RS P1.1) H(RS T)

c H H H N  
 multiple h multiple multiple  
 N(RQ1.2) H(RQ2.1.2) H(RQ3.1.1.n1) H(RS P1.1)N(RS NT)  
 H(RQ1.1) H(RQ3.1.p) H(RS T)

V D I VI V V I I  
 68 69 70 71 72 73 74 75  
 Am

10

H \_\_\_\_\_ H  
 h \_\_\_\_\_ m  
 H(RL1.1) \_\_\_\_\_ H(RQ3.1.1.n2)

c N H c H c N  
 . multiple . multiple . multiple . multiple . multiple . multiple  
 N(RL1.3s) N(RS NT) H(RS P1.2) H(RS P3.1p) H(RQ3.1.1.p1) N(RL1.3n) N(RS NT)  
 H(RS P1.1) \_\_\_\_\_ H(RS P1.1) \_\_\_\_\_ H(RS P1.1) \_\_\_\_\_  
 H(RS T) \_\_\_\_\_ H(RS T) \_\_\_\_\_ H(RS T) \_\_\_\_\_

H N H N H H H  
 . multiple . multiple . multiple . multiple . multiple . multiple  
 H(RS P1.1) N(RS P2.1) N(RS NT) N(RS NT) H(RQ3.1.1.p1) H(RQ3.1.1.n2)  
 H(RS T) \_\_\_\_\_ N(RS NT) \_\_\_\_\_

H N H c H H  
 . multiple . multiple . multiple . multiple . multiple . multiple  
 H(RS P1.1) N(RS NT) H(RS P1.2) H(RS P3.1n) H(RQ3.1.p) H(RQ3.1.n)  
 H(RS T) \_\_\_\_\_ H(RS P1.1) \_\_\_\_\_ H(RS P3.1p) \_\_\_\_\_  
 N(RS NT) \_\_\_\_\_

IV II III III IV IV II IV VII VII VII VII VII VII VII VII VII  
 S S T T S S S S S S S S S S S S S S S S  
 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91

11

c  
 .  
 multiple  
 N(RQ1.2)  
 H(RQ1.1)

c  
 .  
 multiple  
 N(RQ3.6)  
 H(RQ3.1.1.n2)  
 H(RQ3.1.1.p2)

H  
 .  
 multiple  
 H(RQ3.1.1.p2)  
 H(RQ3.1.n)

c  
 .  
 multiple  
 N(RQ1.2)  
 H(RQ1.1)

H  
 .  
 multiple  
 H(RS P1.1)N(RS NT)  
 H(RS T)

H  
 .  
 h  
 H(RQ3.1.1.p1)

c  
 .  
 multiple  
 N(RQ1.2)  
 H(RQ1.1)

H  
 .  
 multiple  
 H(RS P1.2)  
 H(RS P1.1)  
 H(RS T)

c  
 .  
 multiple  
 H(RS P3.1n)  
 H(RS P3.1p)  
 N(RS NT)

H  
 .  
 multiple  
 H(RQ4.1.p)  
 H(RQ3.1.1.n2)  
 H(RQ3.1.p)

H  
 .  
 h  
 H(RQ1.1)

H  
 .  
 multiple  
 H(RS P1.1)N(RS NT)  
 H(RS T)

c  
 .  
 multiple  
 N(RQ3.6)  
 H(RQ3.1.1.n1)  
 H(RQ3.1.1.p1)

H  
 .  
 multiple  
 H(RS P1.1)N(RS NT)  
 H(RS T)

III  
 T  
 92

III  
 T  
 93

II  
 S  
 94

V  
 D  
 95

VI  
 T  
 96

VI  
 T  
 97

IV  
 S  
 98

IV  
 S  
 99

12

H h H m  
 H(RL1.1) H(RQ3.1.1.p2)

c multiple N(RQ1.2) H(RQ2.1.2) H(RQ3.1.p)  
 H(RQ1.1)

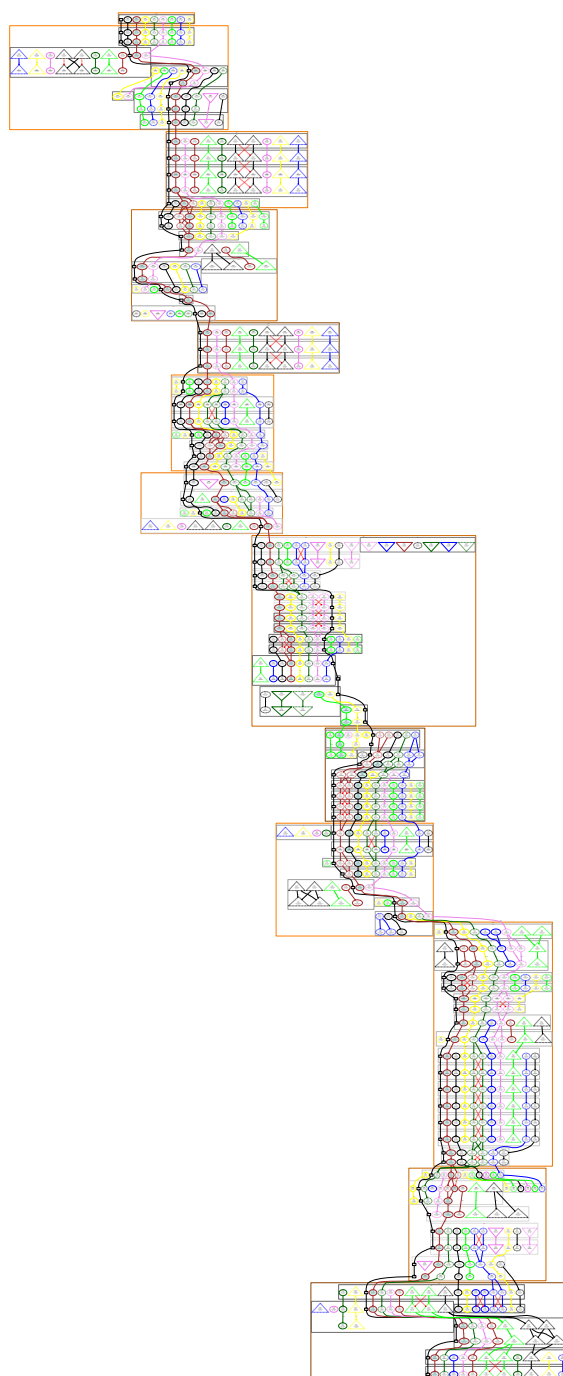
H h N m H h  
 H(RL1.1) N(RS NT) H(RQ3.1.1.p1)

H h H h  
 H(RL1.1) H(RQ3.1.p)

I T 100 I T 101 V D 102 V D 103 I T 104 I T 105

A.1.1. Grafo del coral 25 analizado

Este grafo se incluye sólo para que pueda ser examinado ampliándolo usando un ordenador o tableta.





# B

## Anexo II

### B.1 Análisis de reglas generadas con RIPPER

---

#### Regla 01

```
"rule "r01"
```

```
(instability >= 8) and (nextInterval >= 3)  
and (nextIntervalMode = MINOR) and (prevInterval <= 2) => melodictag=es
```

Las escapadas se pueden colocar con inestabilidad inferior a 8, por lo que acotar la inestabilidad a 8 deja opciones fuera. El siguiente intervalo en modo menor no es determinante ya que también se pueden hacer escapadas donde la resolución se produzca sobre un intervalo mayor o justo. El previnterval si es =1 entonces no es escapada (es la misma nota), pero sí que se puede producir una escapada con el intervalo anterior de segunda. El nextInterval  $\geq 3$  es totalmente correcto como regla para una escapada. Conclusión: regla correcta (para casos muy concretos) y posibles errores como indicar que previnterval puede ser = 1.

#### Regla 02

```
"rule "r02"
```

```
(prevIntervalDir = EQUAL) and (ratio <= 0.5) and (tied = false)  
and (nextIntervalDir = DESCENDING) and (duration >= 1) => melodictag=ap
```

Para indicar que la nota es una apoyatura es muy importante que el nextinterval=2 (la regla no lo indica). La ratio también puede ser =1 pero nos indica que tiene que ser menor o igual que 0.5. Prácticamente todas las apoyaturas resuelven descendiendo, exceptuando principalmente la sensible por la tónica que asciende, con lo que la condición nextIntervalDir = DESCENDING es la más probable pero no se puede descartar la opción de un intervalo siguiente ascendente. Determina muy bien que el intervalo anterior tiene que ser un unísono ya que para poder realizar una apoyatura ésta tiene que estar preparada. Regla bastante correcta delimita algunas apoyaturas, sobre todo las ascendentes.

## APÉNDICE B. ANEXO II

---

### Regla 03

```
"rule "r03"
```

```
(tied = true) => melodictag=s
```

Es muy importante que no sea nota constitutiva del acorde, para ello hay que comprobado con el análisis armónico.

### Regla 04

```
"rule "r04"
```

```
(instability >= 5) and (nextIntervalDir = ASCENDING) and (prevIntervalDir = DESCENDING)  
and (prevInterval <= 2) and (nextIntervalMode = MAJOR) => melodictag=n
```

El previnterval no debe de ser menor de 2 (sería la misma nota). Sólo sirve el intervalo de segunda. El nextintervalmode también puede ser menor. Pero lo importante es que sea de segunda (nextinterval=2), esto no lo indica la regla. En vez de colocar un valor de estabilidad, se debería de realizar una operación de entorno de estabilidad. Por ejemplo si se tiene tres negras la segunda negra es la más inestable (porque en su entorno está el 1 (para la primera negra) y el 2 (para la tercera negra) aunque su valor de instability sea 3 (que es menor que 5).

### Regla 05

```
"rule "r05"
```

```
(instability >= 5) and (instability >= 13) and (instability <= 13)  
and (prevIntervalDir = DESCENDING) and (nextIntervalMode = MINOR) => melodictag=n
```

(instability  $\geq 5$ ) and (instability  $\geq 13$ ) and (instability  $\leq 13$ ). Esto viene a decir que la inestabilidad es 13. No tiene por qué tener relación la dirección del intervalo anterior con el modo del siguiente intervalo. Regla no concluyente.

### Regla 06

```
"rule "r06"
```

```
(ratio <= 0.5) and (duration >= 1) and (prevIntervalMode = MINOR)  
and (nextIntervalMode = MINOR) and (instability >= 5) and (instability <= 6) => melodictag=n
```

duration  $\geq 1$  implica negra o más. ratio  $\leq 0.5$  implica que el entorno rítmico tiene valores superiores. instability  $\geq 5$ ) and (instability  $\leq 6$  implica que está ubicada en una corchea. Incongruencia. Determina que la nota analizada es una negra o superior, y que está ubicada en el subtiempo del primer tiempo, es decir en el segundo tiempo (la segunda corchea) y que también está ubicada en el segundo tiempo, con lo que la ubicación nos está determinando que se trata de una negra y que su entorno rítmico (ratio) tiene valores superiores concluyendo con que es una bordadura.

## B.1. ANÁLISIS DE REGLAS GENERADAS CON RIPPER

---

### Regla 07

```
"rule "r07"
```

```
(instability >= 5) and (nextIntervalMode = MAJOR)
and (prevInterval <= 2) and (nextIntervalDir = ASCENDING) => melodictag=p
```

Indica correctamente la ubicación más genérica de una nota de paso ya que establece que la inestabilidad debe de ser 5 o superior a 5, estableciendo de esta manera todos los subtiempos del compás. También nos indica que el siguiente intervalo debe de ser como máximo de segunda y, efectivamente, para establecer un paso o un paso cromático, el intervalo melódico anterior debe de ser como máximo de segunda. El modo del intervalo en este caso es irrelevante y la dirección del siguiente intervalo debe de ser complementaria a la dirección del intervalo anterior. La regla determina variables muy concretas para la detección de una nota de paso pero falta por detectar más variables, como  $(\text{nextInterval} \leq 2)$ ,  $((\text{nextIntervalDir} = \text{ASCENDING}) \text{ and } (\text{prevIntervalDir} = \text{ASCENDING}))$ , o  $((\text{nextIntervalDir} = \text{DESCENDING}) \text{ and } (\text{prevIntervalDir} = \text{DESCENDING}))$ .

### Regla 08

```
"rule "r08"
```

```
(instability >= 5) and (prevInterval <= 2) and (instability <= 6) and (nextIntervalMode = MAJOR)
and (ratio >= 0.5) and (duration <= 0.5) and (prevIntervalMode = MINOR) => melodictag=p
```

Determina correctamente que para que una nota sea etiquetada como un paso ésta debe de tener una inestabilidad igual a 5, pero se tiene que tener también en cuenta que puede haber notas de paso en inestabilidades inferiores a 5, como puede ser en  $\text{instability} = 3$  o  $\text{instability} = 4$ , y evidentemente, también se puede producir notas de paso con  $\text{instability} > 5$ . También determina correctamente que debe de tratarse de una corchea ( $\text{duration} \leq 0.5$ ) y que, puesto que está ubicada en la segunda corchea del compás la siguiente nota es una negra, determinando de esta manera ( $\text{ratio} \geq 0.5$ ). Los modos de los intervalos no son concluyentes para esta regla y a la variable  $(\text{prevInterval} \leq 2)$  se debe de complementar con  $(\text{nextInterval} \leq 2)$ . La regla cumple con las premisas para analizar que una nota puede ser un paso pero necesita determinar otras variables complementarias para dicha detección como se acaba de explicar.

### Regla 09

```
"rule "r09"
```

```
(instability >= 5) and (prevInterval <= 2) and (nextIntervalMode = MINOR)
and (prevIntervalMode = MAJOR) => melodictag=p
```

Determina que la inestabilidad tiene que ser mayor o igual a 5 y que el intervalo anterior tiene que ser menor o igual que una segunda para analizar una nota como un paso. Le falta la variable  $\text{nextInterval} \leq 2$  para completar la regla. Los modos de los intervalos anteriores y posteriores no son concluyentes en esta regla.

## APÉNDICE B. ANEXO II

---

### Regla 10

```
"rule "r10"
```

```
(instability >= 5) and (nextIntervalDir = DESCENDING) and (prevIntervalDir = DESCENDING)  
and (ratio >= 0.5) and (nextInterval <= 2) and (instability <= 7) => melodictag=p
```

La regla es prácticamente correcta, le falta indicar  $\text{prevInterval} \leq 2$  para analizar una nota como un paso.

### Regla 11

```
"rule "r11"
```

```
(instability >= 8) and (nextIntervalMode = MAJOR) and (instability <= 10)  
and (duration <= 0.5) and (duration >= 0.5) => melodictag=p
```

Esta regla determina que una nota ubicada con una inestabilidad entre 8 y 10, siendo ésta una corchea, la etiqueta como una nota de paso. La regla determina bien un rango de inestabilidad para analizar una nota como un paso pero le falta la direccionalidad del intervalo anterior y del intervalo posterior.

### Regla 12

```
"rule "r12"
```

```
=> melodictag=h
```

Esta regla encuentra que lo más seguro cuando no se tiene más información es etiquetar la nota como real.

### Regla 13

```
"rule "r13"
```

```
(instability >= 8) and (nextInterval >= 3) and (nextIntervalMode = MINOR)  
and (prevInterval <= 2) => melodictag=es
```

La variable `nextIntervalMode`, es decir, indicar el modo del intervalo siguiente, no es determinante para esta regla. Aunque la inestabilidad puede ser menor, las demás variables determinan muy fielmente la regla para el análisis de una escapada.

### Regla 14

```
"rule "r14"
```

```
(prevIntervalDir = EQUAL) and (ratio <= 0.5) and (tied = false) and (nextIntervalDir = DESCENDING)  
and (duration >= 1) and (instability <= 3) and (duration >= 2) => melodictag=ap
```

## B.1. ANÁLISIS DE REGLAS GENERADAS CON RIPPER

---

Indica que la duración debe de ser superior o igual a 2 ((duration  $\geq$  1) and (duration  $\geq$  2)) por lo que se trata de una duración muy grande (una blanca). Según estas características se podía dar el caso de una blanca ubicada en el tercer tiempo del compás y que resolviera en el primer tiempo del siguiente compás, por lo que, en ese caso, no se trataría de una apoyatura. Las características que determina esta regla son muy semejantes a las condiciones para analizar una nota como una apoyatura. Indica que el intervalo anterior debe de ser unísono y que el siguiente intervalo debe de ser descendente, pero le falta determinar la variable nextInterval = 2 para poder analizar la nota como una apoyatura.

### Regla 15

```
"rule "r15"
```

```
(prevIntervalDir = EQUAL) and (ratio <= 0.5) and (tied = false) and (nextIntervalDir = DESCENDING)
and (duration >= 1) and (instability <= 3) and (instability >= 3) => melodictag=ap
```

Esta regla es muy parecida a la regla anterior, pero este caso especifica que la inestabilidad es 3 ((instability  $\leq$  3) and (instability  $\geq$  3)), es decir se trata del segundo tiempo del compás, además indica que es, como mínimo, una negra (duration  $\geq$  1), con lo que la resolución de esta nota sería en el tercer tiempo de tal manera que no puede tratarse con estas condiciones de una apoyatura.

### Regla 16

```
"rule "r16"
```

```
(prevIntervalDir = EQUAL) and (ratio <= 0.5) and (tied = false)
and (nextIntervalDir = DESCENDING) and (instability <= 3) and (nextInterval <= 2)
and (nextIntervalMode = MINOR) and (duration <= 0.5) => melodictag=ap
```

Regla correcta. El modo del siguiente intervalo no importa en este caso (nextIntervalMode = MINOR), la estabilidad dado que se trata de una corchea como máximo (duration  $\leq$  0.5) puede tener una inestabilidad de un máximo de 4, aunque la regla lo está acotando a un máximo de 3 (instability  $\leq$  3).

### Regla 17

```
"rule "r17"
```

```
(prevIntervalDir = EQUAL) and (ratio <= 0.5) and (tied = false)
and (nextIntervalDir = DESCENDING) and (duration >= 1)
and (nextIntervalMode = MAJOR) and (instability <= 1) => melodictag=ap
```

Esta regla indica que una negra como mínimo (duration  $\geq$  1) ubicada en el primer tiempo de compás (instability  $\leq$  1) y con un entorno rítmico menor (ratio  $\leq$  0.5), además de no estar ligada y de tener un unísono con el intervalo anterior y descender con el intervalo melódico posterior, es analizada como apoyatura, pero le falta una variable muy importante para obtener la regla totalmente correcta, el intervalo melódico posterior debe de ser de segunda (nextInterval = 2).

## APÉNDICE B. ANEXO II

---

### Regla 18

```
"rule "r18"
```

```
(prevIntervalDir = EQUAL) and (ratio <= 0.5) and (tied = false)
and (nextIntervalDir = DESCENDING) and (nextIntervalMode = MAJOR)
and (instability <= 2) and (instability >= 2) and (duration >= 0.5) => melodictag=ap
```

Esta regla tiene características muy parecidas a la regla anterior pero indicando una nota (corchea como mínimo) que está ubicada en el tercer tiempo. Al igual que ocurre con la regla anterior, le falta la variable de resolución de la apoyatura (`nextInterval = 2`).

### Regla 19

```
"rule "r19"
```

```
(tied = true) and (nextIntervalMode = MINOR) and (instability <= 1) => melodictag=s
```

En esta regla se analiza como retardo una nota ubicada en el primer tiempo de compás y que viene ligada del compás anterior. El modo del siguiente intervalo no es necesario en esta regla y se debe de destacar que todas las notas ubicadas en el primer tiempo de compás y que vienen ligadas del anterior no son retardos ya que puede ser, por ejemplo, una nota común a ambas armonías. Además no indica que la resolución del retardo debe de ser de segunda (`nextInterval = 2`) al igual que ocurría con la apoyatura.

### Regla 20

```
"rule "r20"
```

```
(tied = true) and (nextIntervalDir = DESCENDING) and (duration >= 1)
and (ratio <= 0.5) and (instability >= 3) => melodictag=s
```

Esta regla da indicios de normas para la detección de un retardo, como puede ser que la nota tiene que venir ligada y que el siguiente intervalo debe de ser descendente, pero es incompleta, ya que, por ejemplo además de la direccionalidad del intervalo se necesita que el intervalo siguiente no se a superior a la segunda.

### Regla 21

```
"rule "r21"
```

```
(tied = true) and (nextIntervalDir = DESCENDING) and (instability <= 1)
and (duration >= 1) and (duration <= 1) => melodictag=s
```

A esta regla lo único que le hubiese faltado indicar para analizar correctamente el retardo es que el intervalo posterior fuese de segunda, ya que indica que la nota tiene que venir ligada, que posee una duración de negra, que el siguiente intervalo debe de ser descendente y que está ubicada en el primer tiempo de compás.

## B.1. ANÁLISIS DE REGLAS GENERADAS CON RIPPER

---

### Regla 22

```
"rule "r22"
```

```
(tied = true) and (nextIntervalDir = DESCENDING) and (instability <= 2)
and (duration >= 0.5) and (duration <= 0.5) and (instability >= 2) => melodictag=s
```

Esta regla indica que el retardo se produce en el tercer tiempo, siendo una corchea, viniendo ligada de la nota anterior y que el siguiente intervalo es descendente. Al igual que la regla anterior, le falta indicar que el intervalo siguiente sea de segunda.

### Regla 23

```
"rule "r23"
```

```
(tied = true) and (nextIntervalDir = DESCENDING)
and (instability <= 1) and (duration <= 0.5) => melodictag=s
```

Esta regla indica que el retardo se produce en el primer tiempo, siendo una corchea, viniendo ligada de la nota anterior y que el siguiente intervalo es descendente. Es igual que la anterior pero modificando el tercer tiempo por el primero. Al igual que la regla anterior, le falta indicar que el intervalo siguiente sea de segunda.

### Regla 24

```
"rule "r24"
```

```
(tied = true) and (instability >= 3) and (nextIntervalMode = MINOR)
and (duration <= 0.5) and (instability <= 3) => melodictag=s
```

En este caso no indica que el siguiente intervalo sea descendente, como ha ocurrido en la mayoría de las reglas anteriores, pero indica el modo del intervalo. Para que esta variante sea determinante en el análisis de una nota como retardo, hay que indicar además que el intervalo posterior sea ascendente y de segunda. Estaríamos hablando del retardo de la sensible por la tónica.

### Regla 25

```
"rule "r25"
```

```
(tied = true) and (nextIntervalMode = MAJOR) and (duration >= 2) => melodictag=s
```

Al igual que en las reglas anteriores, faltan variables para determinar que el análisis de la nota sea un retardo, como por ejemplo que el intervalo posterior sea de segunda.

### Regla 26

```
"rule "r26"
```

```
(tied = true) and (instability >= 3) and (nextIntervalDir = ASCENDING)
and (duration <= 0.5) => melodictag=s
```

## APÉNDICE B. ANEXO II

---

Determina que para analizar la nota como retardo, ésta viene ligada, que está ubicada en el segundo tiempo (o en un tiempo más inestable), que es una corchea como máximo y que el siguiente intervalo es ascendente. La inestabilidad puede dispararse y detectar notas que estén ubicadas en subtiempos, es decir ( $\text{instability} \geq 5$ ), además falta determinar el intervalo melódico siguiente que debe de ser de segunda.

### Regla 27

```
"rule "r27"
```

```
(instability >= 5) and (nextIntervalDir = ASCENDING) and (prevIntervalDir = DESCENDING)
and (prevInterval <= 2) and (nextIntervalMode = MAJOR)
and (duration >= 1) and (instability <= 6) => melodictag=n
```

Esta regla indica que la nota a analizar es una bordadura. Todas las variables son correctas para indicar que es una bordadura pero le falta indicar que el siguiente intervalo debe de ser de segunda.

### Regla 28

```
"rule "r28"
```

```
(instability >= 5) and (instability >= 13) and (instability <= 13)
and (prevIntervalDir = DESCENDING) and (nextIntervalMode = MINOR) => melodictag=n
```

Esta regla detecta una nota ubicada en la cuarta semicorchea del primer tiempo. Detecta bien la ubicación donde puede haber una bordadura pero le faltan muchos parámetros, como por ejemplo, que el intervalo anterior y posterior deben de ser de segunda y la direccionalidad del segundo intervalo debe de ser complementaria a la del primero.

### Regla 29

```
"rule "r29"
```

```
(instability >= 5) and (instability >= 13) and (nextIntervalDir = ASCENDING) and
(nextIntervalMode = MAJOR) and (prevIntervalDir = DESCENDING) and
(instability <= 15) and (duration <= 0.25) => melodictag=n
```

Esta regla detecta las semicorcheas ubicadas entre los cuartos subtiempos del primer, segundo y tercer tiempo y detecta la complementariedad de la direccionalidad del intervalo anterior y el posterior, pero le falta indicar que el intervalo anterior y posterior deben de ser de segunda.

### Regla 30

```
"rule "r30"
```

```
(ratio <= 0.5) and (instability >= 5) and (instability <= 6)
and (nextIntervalMode = MINOR) and (prevIntervalMode = MINOR) and (duration >= 1)
and (prevInterval <= 2) and (prevIntervalDir = DESCENDING) => melodictag=n
```



---

## B.1. ANÁLISIS DE REGLAS GENERADAS CON RIPPER

---

Esta regla detecta que el modo del intervalo anterior y posterior debe de ser el mismo y que el intervalo anterior es de segunda, pero le falta detectar que el intervalo posterior también debe de ser de segunda y que la dirección del intervalo posterior debe de complementarse con la dirección del intervalo anterior.

### Regla 31

```
"rule "r31"
```

```
(ratio <= 0.5) and (prevInterval <= 2) and (instability >= 5)
and (nextIntervalDir = ASCENDING) and (prevIntervalDir = DESCENDING)
and (instability <= 5) and (prevIntervalMode = MAJOR) => melodictag=n
```

A esta regla lo único que le falta para analizar correctamente una bordadura es indicar que el intervalo posterior debe de ser también de segunda ya que detecta la complementariedad de la direccionalidad del entorno interválico, la ubicación es un subtiempo y la ratio es menor que uno.

### Regla 32

```
"rule "r32"
```

```
(instability >= 5) and (nextIntervalMode = MAJOR) and (instability <= 6)
and (prevInterval <= 2) and (ratio >= 0.5) and (instability <= 5)
and (duration <= 0.5) and (prevIntervalDir = ASCENDING) => melodictag=p
```

Esta regla analiza una corchea ubicada en el segundo subtiempo (la segunda corchea) del primer tiempo con una ratio menor que uno y con un intervalo anterior menor o igual que la segunda para determinar que es un paso. Los parámetros son correctos pero le falta indicar que el intervalo posterior sea también de segunda y que la direccionalidad del intervalo anterior y posterior no debe de cambiar.

### Regla 33

```
"rule "r33"
```

```
(instability >= 5) and (nextIntervalMode = MAJOR) and (prevInterval <= 2)
and (instability <= 6) and (ratio >= 0.5) and (prevIntervalMode = MINOR)
and (prevIntervalDir = DESCENDING) and (duration <= 0.5) => melodictag=p
```

Esta regla no determina el entorno interválico de la nota a analizar, es decir no indica que el intervalo melódico anterior y el posterior deben de ser como máximo de segunda y como mínimo un cromatismo para analizar la nota como paso.

### Regla 34

```
"rule "r34"
```

```
(instability >= 5) and (prevInterval <= 2) and (nextIntervalMode = MAJOR)
and (prevIntervalDir = ASCENDING) and (nextIntervalDir = ASCENDING)
and (duration >= 1) and (instability >= 7) => melodictag=p
```

## APÉNDICE B. ANEXO II

---

Esta regla determina correctamente la direccionalidad del intervalo anterior y posterior, la inestabilidad y el intervalo anterior que sea como máximo de segunda pero devuelve una duración mayor o igual a la negra, con lo que la nota a analizar no puede considerarse un paso. Lo más seguro es que se tenga que desdoblarse en dos notas ligadas.

### Regla 35

"rule "r35"

```
(instability >= 5) and (prevInterval <= 2) and (nextIntervalMode = MAJOR)
and (instability <= 6) and (ratio >= 0.5) and (instability <= 5)
and (prevIntervalDir = ASCENDING) and (prevIntervalMode = MAJOR) => melodictag=p
```

Esta regla analiza como un paso la corchea ubicada en el segundo subtiempo del primer compás (en la segunda corchea) como una nota de paso. Las premisas que devuelve son correctas pero le falta indicar que el siguiente intervalo sea de segunda y la direccionalidad del intervalo posterior sea ascendente, al igual que ocurre con el intervalo melódico anterior.

### Regla 36

"rule "r36"

```
(instability >= 5) and (prevInterval <= 2) and (nextIntervalMode = MAJOR)
and (instability <= 6) and (ratio >= 0.5) and (instability <= 5)
and (prevIntervalDir = ASCENDING) => melodictag=p
```

Esta regla es igual que la anterior pero sin la variable del modo del intervalo anterior pero el modo para analizar una nota como un paso no es determinante. Al igual que la regla anterior, las premisas que devuelve son correctas pero le falta indicar que el siguiente intervalo sea de segunda y la direccionalidad del intervalo posterior sea ascendente, al igual que ocurre con el intervalo melódico anterior.

### Regla 37

"rule "r37"

```
(instability >= 5) and (prevInterval <= 2) and (nextIntervalMode = MAJOR)
and (instability <= 6) and (ratio >= 0.5) and (instability <= 5)
and (duration <= 0.5) => melodictag=p
```

Para indicar que la nota analizada es un paso, necesita indicar que la variable del intervalo posterior sea de segunda. Los demás parámetros son correctos.

### Regla 38

"rule "r38"

```
(instability >= 5) and (prevInterval <= 2) and (nextIntervalMode = MAJOR)
and (instability <= 6) and (ratio >= 0.5) and (prevIntervalMode = MINOR)
and (prevIntervalDir = DESCENDING) and (instability >= 6) => melodictag=p
```

---

## B.2. ANÁLISIS DE REGLAS GENERADAS CON ILP

---

Falta determinar el entorno interválico de la nota para analizarla como una nota de paso.

### Regla 39

```
"rule "r39"
```

```
(instability >= 5) and (prevInterval <= 2) and (nextInterval >= 2)
and (prevIntervalDir = ASCENDING) and (nextIntervalDir = ASCENDING)
and (nextIntervalMode = MAJOR) and (instability <= 7) and (instability >= 7) => melodictag=p
```

Sólo le falta indicar que el intervalo melódico posterior sea de segunda para analizar la nota como una nota de paso.

### Regla 40

```
"rule "r40"
```

```
(instability >= 5) and (prevInterval <= 2) and (nextInterval >= 2)
and (prevIntervalMode = MAJOR) and (nextIntervalMode = MINOR) and (nextIntervalDir = ASCENDING)
and (instability <= 6) and (duration >= 1) and (instability >= 6) => melodictag=p
```

En este caso sólo le falta indicar que el intervalo anterior sea ascendente para analizar la nota como una nota de paso. Muy buena regla.

## B.2 Análisis de reglas generadas con ILP

---

Análisis de reglas generadas por ILP conforme se detalla en la sección [4.1.2](#).

### Regla 1

```
melanalysis(A,B,C,[n]) :-
    tied(A,B,C,false),instability(A,B,C5),pred(A,B,C,D),pred(A,B,D,E),prev_int(A,B,E,i3_MINOR).
```

Para determinar que una nota sea una bordadura no se necesita saber el intervalo de la segunda nota anterior.

### Regla 2

```
melanalysis(A,B,C,[h]) :-
    tied(A,B,C,false),instability(A,B,C,5),next_int(A,B,C,i2_MAJOR),
    pred(A,B,C,D),next_int(A,B,D,i3_MAJOR), !.
```

La regla es totalmente correcta ya que determina que una nota es real porque el intervalo melódico siguiente es un intervalo de tercera mayor.

### Regla 3

```
melanalysis(A,B,C,[p]) :-
    tied(A,B,C,false),instability(A,B,C,5),next_int(A,B,C,i2_MAJOR), !.
```

Correcto, pero faltan determinantes: por ejemplo el intervalo melódico anterior.

## APÉNDICE B. ANEXO II

---

### Regla 4

```
melanalysis(A,B,C,[n]) :-  
    tied(A,B,C,false),instability(A,B,C,5),succ(A,B,C,D),next_int(A,B,D,i2_MAJOR), !.
```

Correcto, pero faltan determinantes: por ejemplo el intervalo melódico anterior.

### Regla 5

```
melanalysis(A,B,C,[h]) :- tied(A,B,C,false),instability(A,B,C,5), !.
```

Poco probable. Se necesitan más elementos.

### Regla 6

```
melanalysis(A,B,C,[h]) :-  
    tied(A,B,C,false),pred(A,B,C,D),prev_dir(A,B,D,withrest),prev_dir(A,B,C,equal), !.
```

Con “D” sería muy buena regla. Siendo  $C = D$  podría extenderse a C. Es decir, muy buena regla.

### Regla 7

```
melanalysis(A,B,C,[p]) :-  
    tied(A,B,C,false),pred(A,B,C,D),prev_dir(A,B,D,withrest),prev_dir(A,B,C,ascending), !.
```

Regla no determinante.

### Regla 8

```
melanalysis(A,B,C,[n]) :-  
    tied(A,B,C,false),pred(A,B,C,D),prev_dir(A,B,D,withrest),next_dir(A,B,C,ascending), !.
```

Regla no determinante.

### Regla 9

```
melanalysis(A,B,C,[p]) :- tied(A,B,C,false),pred(A,B,C,D),prev_dir(A,B,D,withrest), !.
```

Regla no determinante.

### Regla 10

```
melanalysis(A,B,C,[p]) :-  
    tied(A,B,C,false),pred(A,B,C,D),pred(A,B,D,E),ratio(A,B,E,2.0),ratio(A,B,D,2.0), !.
```

Para que “E” y “D” tengan  $\text{ratio}=2.0$  el antecesor de E debe de tener la mitad del valor de E y C también debe de tener la mitad del valor de D. La regla expresa el determinante del ratio pero le faltan muchos más determinantes para afirmar que C es una nota de paso.

---

## B.2. ANÁLISIS DE REGLAS GENERADAS CON ILP

---

### Regla 11

```
melanalysis(A,B,C,[n]) :-  
    tied(A,B,C,false),pred(A,B,C,D),pred(A,B,D,E),ratio(A,B,E,2.0),pred(A,B,E,F),  
    ratio(A,B,F,1.0),prev_int(A,B,F,i2_MINOR),prev_dir(A,B,F,ascending), !.
```

La regla nos da determinantes que no son influyentes en la determinación del análisis de la nota. No se necesita el análisis de cuatro notas anteriores para determinar que la nota analizada es una bordadura.

### Regla 12

```
melanalysis(A,B,C,[p]) :-  
    tied(A,B,C,false),pred(A,B,C,D),pred(A,B,D,E),ratio(A,B,E,2.0),  
    pred(A,B,E,F),ratio(A,B,F,1.0),prev_int(A,B,F,i2_MINOR), !.
```

Además de la ratio, en esta regla se determina el valor del intervalo melódico que hay entre la tercera y cuarta nota a la nota analizada. No se necesita determinar variables de cuatro notas anterior a la nota analizada para determinar que la nota es una bordadura.

### Regla 13

```
melanalysis(A,B,C,[p]) :-  
    tied(A,B,C,false),pred(A,B,C,D),pred(A,B,D,E),ratio(A,B,E,2.0),  
    pred(A,B,E,F),ratio(A,B,F,1.0),prev_dir(A,B,F,ascending), !.
```

Esta regla determina que el intervalo que tiene anterior, la tercera nota, antes de la nota analizada es un intervalo ascendente, además nos devuelve dos ratios, el de la tercera nota anterior y el de la segunda nota anterior, pero no determina nada en absoluto del entorno más inmediato de la nota analizada. Con lo cual la información que nos devuelve esta regla no es concluyente para determinar que la nota es una nota de paso.

### Regla 14

```
melanalysis(A,B,C,[p]) :-  
    tied(A,B,C,false),pred(A,B,C,D),pred(A,B,D,E),ratio(A,B,E,2.0),  
    pred(A,B,E,F),ratio(A,B,F,1.0),prev_dir(A,B,E,ascending), !.
```

Para determinar que una nota es una bordadura no se necesita las características analíticas de la cuarta nota anterior.

### Regla 15

```
melanalysis(A,B,C,[p]) :-  
    tied(A,B,C,false),pred(A,B,C,D),pred(A,B,D,E),ratio(A,B,E,2.0),  
    pred(A,B,E,F),ratio(A,B,F,1.0),succ(A,B,C,G),succ(A,B,G,H),ratio(A,B,H,0.0), !.
```

Del entorno más inmediato de la nota analizada “C”, es decir, “D” y “G” no determina ninguna característica, realiza un propagación hasta tres notas anteriores y dos posteriores para determinar que la nota analizada es una nota de paso. No se necesita esa información para determinar que una nota es un paso. Además cabe destacar que ha dado una ratio de 0.0, esto sólo es posible cuando la división posee tiene como dividendo 0.

## APÉNDICE B. ANEXO II

---

### Regla 16

```
melanalysis(A,B,C,[h]) :-  
    tied(A,B,C,false),pred(A,B,C,D),pred(A,B,D,E),  
    ratio(A,B,E,2.0),pred(A,B,E,F),ratio(A,B,F,1.0), !.
```

Establece la ratio de la segunda y tercera nota anterior a la analizada para indicar que la nota es real. No es determinante esas premisas para establecer que la nota es real.

### Regla 17

```
melanalysis(A,B,C,[h]) :-  
    tied(A,B,C,false),pred(A,B,C,D),pred(A,B,D,E),ratio(A,B,E,2.0), !.
```

Al igual que la regla anterior además del hecho de que la nota a analizar no esté ligada, no es determinante para establecer que la nota es real.

### Regla 18

```
melanalysis(A,B,C,[ap]) :-  
    tied(A,B,C,false),succ(A,B,C,D),instability(A,B,D,5),pred(A,B,C,E),prev_int(A,B,E,i2_MINOR), !.
```

Esta regla determina que la nota analizada es una apoyatura a partir de la característica de la inestabilidad = 5 de la nota posterior y del intervalo melódico producido entre la nota anterior y su antecesora que indica que es de segunda menor. Entendiendo que el valor de división es de corchea, estaríamos determinando que la nota a analizar está ubicada en el primer tiempo de compás (es decir, inestabilidad = 1), con lo que la regla determinaría exactamente la posición correcta de una apoyatura. No obstante, con estas características, evidentemente, podía tratarse también de una nota real, por lo que se necesita mucha más información para determinar que la nota sea una apoyatura.

### Regla 19

```
melanalysis(A,B,C,[h]) :- tied(A,B,C,false),succ(A,B,C,D),instability(A,B,D,5), !.
```

Esta regla determina, al igual que la regla anterior, que entendiendo que el valor de división es de corchea, estaríamos determinando que la nota a analizar está ubicada en el primer tiempo de compás (es decir, inestabilidad=1) con lo que la regla determinaría exactamente la posición más probable de encontrar una nota real pero también podría tratarse de una nota extraña con estas características.

### Regla 20

```
melanalysis(A,B,C,[ap]) :-  
    tied(A,B,C,false),succ(A,B,C,D),succ(A,B,D,E),ratio(A,B,E,0.0),pred(A,B,C,F),ratio(A,B,F,2.0), !.
```

Nos determina que la nota analizada “C” es una apoyatura partiendo de que la nota anterior posee una ratio de 2.0 y dos notas después tiene una ratio de 0.0 además de indicar que la nota analizada no está ligada. Las características no son en absoluto determinantes para indicar que la nota es una apoyatura.

## B.2. ANÁLISIS DE REGLAS GENERADAS CON ILP

---

### Regla 21

```
melanalysis(A,B,C,[h]) :-  
    tied(A,B,C,false),succ(A,B,C,D),succ(A,B,D,E),ratio(A,B,E,0.0), !.
```

No es determinante la ratio de dos notas después de la nota analizada para determinar que ésta es una nota real.

### Regla 22

```
melanalysis(A,B,C,[h]) :-  
    tied(A,B,C,false),ratio(A,B,C,0.5),pred(A,B,C,D),instability(A,B,D,4),prev_dir(A,B,D,ascending), !.
```

No indica la inestabilidad de C, que sería bastante importante en este caso, ya que con ratio 0.5 lo normal (sin saber la inestabilidad) sería una nota extraña. No podemos deducir que está en la inestabilidad=1 porque el valor de D también puede ser una corchea y por tanto estar C con inestabilidad 8. Regla no determinante.

### Regla 23

```
melanalysis(A,B,C,[p]) :-  
    tied(A,B,C,false),ratio(A,B,C,0.5),pred(A,B,C,D),instability(A,B,D,4), !.
```

Es prácticamente igual a la regla anterior pero en este caso no se indica el intervalo melódico anterior a “D”. Puesto que dicho intervalo melódico no es referente para deducir el carácter de la nota, se mantiene exactamente las mismas premisas que en la regla anterior. Haría falta además de la ratio, la secuencia interválica anterior y posterior a la nota analizada y la inestabilidad de ésta para determinar que la nota analizada es una nota de paso.

### Regla 24

```
melanalysis(A,B,C,[p]) :-  
    tied(A,B,C,false),ratio(A,B,C,0.5),pred(A,B,C,D),ratio(A,B,D,0.5),prev_dir(A,B,C,ascending), !.
```

Determina bien el valor de la ratio para analizarla como una nota de paso, pero faltan los datos de inestabilidad y de intervalo para establecer la nota como una nota de paso.

### Regla 25

```
melanalysis(A,B,C,[h]) :-  
    tied(A,B,C,false),ratio(A,B,C,0.5),pred(A,B,C,D),ratio(A,B,D,0.5), !.
```

Nos indica que en el entorno rítmico de “D” y “C” estas notas tienen menos valor rítmico que su entorno, con lo que son notas menos importantes que sus entornos rítmicos. Una nota con la característica de una ratio=0.5, a priori, no tiene que ser nota real, aunque, evidentemente, se necesita más características para concretar el carácter de la nota.

## APÉNDICE B. ANEXO II

---

### Regla 26

```
melanalysis(A,B,C,[ap]) :-  
    tied(A,B,C,false),ratio(A,B,C,0.5),pred(A,B,C,D),pred(A,B,D,E),  
    prev_int(A,B,E,i1_PERFECT),succ(A,B,C,F),succ(A,B,F,G),ratio(A,B,G,2.0), !.
```

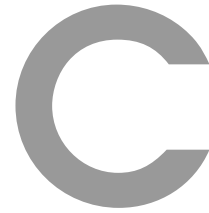
La regla no tiene determinantes para indicar que la nota es una apoyatura.

### Regla 27

```
melanalysis(A,B,C,[h]) :-  
    tied(A,B,C,false),ratio(A,B,C,0.5),pred(A,B,C,D),pred(A,B,D,E),prev_int(A,B,E,i1_PERFECT), !.
```

La regla no tiene determinantes para indicar que la nota es una nota real. es una reducción de la regla anterior, le falta los intervalos siguientes a “C”.





## Anexo III

Relación de las publicaciones y contribuciones a congresos que el autor ha realizado relativas a esta tesis.

**Interactive melodic analysis.** Rizo, D; Illescas, P.R; Iñesta, J.M. In: Computational Music Analysis, Springer, pp. 191-219 (2015) ISBN: 978-3-319-25931-4.

**Melodic analysis of polyphonic music using an interactive pattern recognition tool.** Illescas, P.R.; Rizo, D.; Iñesta, J.M. In: Proceedings of the 7th Machine Learning and Music (MML2014), Barcelona (2014)

**Learning melodic analysis rules.** Illescas, P.R.; Rizo, D.; Iñesta, J.M., Ramírez, R. 4th International Workshop on Music and Machine Learning (MML 2011) at NIPS, Granada (2011)

**Modeling violin performances using inductive logic programming.** Ramírez, R., Pérez, A., Kersten, S., Rizo, D., Illescas P.R., Iñesta, J.M. *Intelligent Data Analysis*, vol. 14, pp. 573-585 (2010)

**Learning to analyse tonal music.** Illescas, P.R., Rizo, D., Iñesta, J.M. In: Proceedings of the International Workshop on Machine Learning and Music (MML 2008) at ICMC, pp. 25-26, Helsinki, Finland (2008)

**Modeling celtic violin expressive performance.** Ramírez, R., Pérez, A., Kersten, S., Rizo, D., Illescas, P.R., Iñesta, J.M. In: Proceedings of the International Workshop on Machine Learning and Music (MML 2008) at ICMC, pp. 7-8, Helsinki, Finland (2008)

**Harmonic, melodic, and functional automatic analysis.** Illescas, P.R., Rizo, D., Iñesta, J.M. In: Proceedings of the International Computer Music Conference (ICMC 2007), pp. 165-168, Copenhagen, Denmark (2007)

# Bibliografía

- Artaza, J. (2001). *Evolución armónica y procedimientos compositivos*. Ed. Master. (Citado en las páginas 25 and 41).
- Barthélemy, J. and Bonardi, A. (2001). Figured bass and tonality recognition. In *Proceedings of ISMIR 2001*, pages 129–136, Bloomington (Indiana), USA. (Citado en las páginas 11, 12, and 13).
- Baumgarten, A. (1977). *Reflexiones filosóficas acerca de la poesía*. Argentina. Aguilar. (Citado en la página 29).
- Bent, I. (1988). *Análisis*. The MacMillan Press LTD. (Citado en las páginas 3, 25, 28, 29, 30, 33, 34, and 38).
- Berry, W. (1966). *Form in Music: an examination of traditional techniques of musical form and their applications in historical and contemporary styles*. Prentice-Hall Inc. (Citado en la página 40).
- Berry, W. (1987). *Structural functions in music*. Dover. (Citado en la página 47).
- Blockeel, H., De Raedt, L., and Ramon, J. (1998). Top-Down Induction of Clustering Trees. In *ICML '98: Proceedings of the Fifteenth International Conference on Machine Learning*, pages 55–63. Morgan Kaufmann Publishers Inc. (Citado en la página 105).
- Brassard, G. and Bratley, P. (1997). *Fundamentals of Algorithmics*. Prentice-Hall. (Citado en las páginas 90 and 92).
- Bukofzer, M. (1986). *La música en la Época barroca. De Monteverdi a Bach*. (Citado en la página 80).
- Chew, E. and Francois, A. (2003). MuSA.RT: Music on the Spiral Array. Real-time. In *Proceedings of the Eleventh ACM International Conference on Multimedia*, pages 448–449, New York, NY, USA. ACM. (Citado en la página 14).
- Choi, A. (2011). Jazz Harmonic Analysis as Optimal Tonality Segmentation. *Computer Music Journal*, 35(2):49–66. (Citado en las páginas 12 and 14).
- Chuan, C.-H. and Chew, E. (2007). A Hybrid System for Automatic Generation of Style-Specific Accompaniment. In *Proceedings of the 4th International Joint Workshop on Computational Creativity*, pages 57–64, London, UK. (Citado en la página 1).
- Chuan, C.-H. and Chew, E. (2010). Quantifying the Benefits of Using an Interactive Decision Support Tool for Creating Musical Accompaniment in a Particular Style. In *Proceedings of ISMIR*, pages 471–476. (Citado en la página 14).
- Chuan, C.-H. and Chew, E. (2011). Generating and evaluating musical harmonizations that emulate style. *Computer Music Journal*, 35(4):64–82. (Citado en las páginas 11, 13, 14, and 115).

- Cohen, W. (1995). Fast effective rule induction. In *Proc. of the 12th International Conference on Machine Learning (ICML)*, pages 115–123. (Citado en las páginas [103](#) and [115](#)).
- Cook, N. (1989). *A guide to musical Analysis*. J. M. Dent & Son Ltd. (Citado en la página [3](#)).
- Crocker, R. (1986). *A history of musical style*. Dover. (Citado en la página [46](#)).
- Czarnecki, C. (2014). *J.S. Bach 413 Chorales*. (Citado en las páginas [XIII](#) and [52](#)).
- Czerny, C. (1849). *Scuola di composizione pratica*. (Citado en las páginas [31](#) and [32](#)).
- de Haas, W. B. (2012). *Music information retrieval based on tonal harmony*. PhD thesis, Utrecht University. (Citado en las páginas [1](#), [8](#), [10](#), and [12](#)).
- de la Motte, D. (1994). *Armonía*. (Citado en la página [79](#)).
- de la Motte, D. (1995). *Contrapunto*. (Citado en la página [79](#)).
- de Momigny, J. (1806). *Cours complet d'harmonie et de composition : d'après une théorie nouvelle et générale de la musique basée sur des principes incontestables, puisés dans la nature d'accord avec tous les bons ouvrages - pratiques anciens et modernes, et mis, par leur clarté, à la portée de tout le monde*. (Citado en la página [30](#)).
- Duda, R. O., Hart, P. E., and Stork, D. G. (2001). *Pattern classification*. 2nd. Edition. New York. (Citado en la página [102](#)).
- Ebcioğlu, K. (1986). An expert system for chorale harmonization. In *Proceedings of the American Association for Artificial Intelligence, AAAI*, pages 784–788. (Citado en la página [1](#)).
- Epstein, D. (1979). *Beyond Orpheus: Studies in Musical Structure*. MIT Press. (Citado en la página [41](#)).
- Feng, Y., Chen, K., and Liu, X.-B. (2011). Harmonizing melody with meta-structure of piano accompaniment figure. *Journal of Computer Science and Technology*, 26(6):1041–1060. (Citado en la página [1](#)).
- Forte, A. (1967). Music and computing: the present situation. *the November 14-16, 1967, fall joint computer conference*, pages 327–329. (Citado en la página [7](#)).
- Forte, A. (1995). *Contemporary Tone-Structures*. (Citado en las páginas [4](#), [5](#), [40](#), [43](#), and [45](#)).
- Granroth-Wilding (2013). *Harmonic Analysis of Music Using Combinatory Categorical Grammar*. PhD thesis, University of Edinburgh. (Citado en la página [8](#)).
-

- Hall, M., Frank, E., Holmes, G., Pfahringer, B., Reutemann, P., and Witten, I. (2009). The WEKA data mining software: an update. *SIGKDD Explorations*, 11(1):10–18. (Citado en la página 120).
- Hiller, L. (1958). *On the Use of a High-speed Electronic Digital Computer of Musical Composition*. (Citado en la página 44).
- Hoffman, E. (1971). *Symphony no. 5 in C minor of Beethoven*. (Citado en la página 31).
- Hoffman, T. and Birmingham, W. (2000). A Constraint Satisfaction Approach to Tonal Harmonic Analysis. Technical report, Electrical Engineering and Computer Science Department, University of Michigan. (Citado en las páginas 12, 13, and 111).
- Hulten, G., Spencer, L., and Domingos, P. (2001). Mining time-changing data streams. In *ACM SIGKDD Intl. Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining*, pages 97–106. ACM Press. (Citado en la página 124).
- Iñesta, J. M. and Pérez-Sancho, C. (2013). Interactive multimodal music transcription. In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2013)*, pages 211–215, Vancouver, Canada. IEEE. (Citado en la página 112).
- Illescas, P. R., Rizo, D., and Iñesta, J. M. (2007). Harmonic, melodic, and functional automatic analysis. In *Proceedings of the 2007 International Computer Music Conference (ICMC)*, pages 165–168. (Citado en las páginas 11, 12, 13, 15, and 118).
- Illescas, P. R., Rizo, D., and Iñesta, J. M. (2008). Learning to analyse tonal music. In *Proc. Int. Workshop on Machine Learning and Music, MML 2008*, pages 25–26, Helsinki (Finland). (Citado en la página 15).
- Illescas, P. R., Rizo, D., Iñesta, J. M., and Ramírez, R. (2011). Learning melodic analysis rules. In *4th Int. Workshop on Music and Machine Learning (MML 2011)*. (Citado en las páginas 13, 14, 15, and 115).
- Jeppesen, K. (1923). *The polyphonic vocal styles of the Sixteenth Century*. (Citado en la página 38).
- Kaliakatsos-Papakostas, M. (2014). Probabilistic harmonisation with fixed intermediate chord constraints. In *Proceedings of the 11th Sound and Music Computing Conference (SMC)*. (Citado en la página 1).
- Keller, H. (2001). *Functional Analysis: The Unity of Contrasting Themes [1957-62]*. (Citado en la página 43).
- Kerman, J. (1965). *Contemplating Music: Challenges to Musicology*. (Citado en la página 42).

- Kirlin, P. B. (2009). Using harmonic and melodic analyses to automate the initial stages of schenkerian analysis. In *Proceedings of the 10th Int. Conference for Music Information Retrieval (ISMIR)*, pages 423–428, Kobe, Japan. (Citado en las páginas [1](#), [12](#), and [13](#)).
- Kirnberger, J. P. (1781). *Grundsätze Des Generalbasses Als Erste Linien Zur Composition*. (Citado en la página [29](#)).
- Koch, H. C. (1782). *Versuch einer Anleitung zur Composition*. (Citado en la página [29](#)).
- Kröger, P., Passos, A., and Sampaio, M. (2010). A survey of automated harmonic analysis techniques. Technical Report 1, Universidade Federal da Bahia. (Citado en la página [10](#)).
- Lendvai, E. (1971). *An analysis of his work*. (Citado en las páginas [46](#) and [51](#)).
- Lerdahl, F. and Jackendoff, R. (1985). *Generative Theory of Tonal Music*. (Citado en las páginas [5](#), [15](#), and [48](#)).
- Lidy, T., Rauber, A., Pertusa, A., and Iñesta, J. M. (2007). Improving genre classification by combination of audio and symbolic descriptors using a transcription system. In *Proc. of the 8th International Conference on Music Information Retrieval (ISMIR)*, pages 61–66, Vienna, Austria. (Citado en la página [112](#)).
- Lippius, J. (1612). *Synopsis musicae novae*. (Citado en la página [26](#)).
- Lobe, J. (1850). *Lehrbuch der musikalischen Komposition*. (Citado en las páginas [32](#) and [35](#)).
- Logier, J. B. (1827). *A system of the science of music and practica composition, incidentally comprising what is usually understood by the term thorough bass*. (Citado en la página [31](#)).
- Margineantu, D. D. and Dietterich, T. G. (2003). Improved Class Probability Estimates from Decision Tree Models. In *Nonlinear Estimation and Classification*, pages 173–188. Springer New York, New York, NY. (Citado en la página [115](#)).
- Marsden, A. (2010). Schenkerian Analysis by Computer: A Proof of Concept. *Journal of New Music Research*, 39(3):269–289. (Citado en la página [1](#)).
- Martin, J. G. (1972). Rhythmic (hierarchical) versus serial structure in speech and other behavior. *Psychol Review*, 79(6):487–509. (Citado en la página [104](#)).
- Marx, A. B. (1837). *Die Lehre von der musikalischen Komposition, praktisch theoretisch von Adolf Bernhard Marx*. (Citado en la página [33](#)).
-

- Maxwell, H. J. (1984). *An Artificial Intelligence Approach to Computer-implemented Analysis of Harmony in Tonal Music*. Indiana University. (Citado en las páginas [12](#), [13](#), [14](#), [15](#), [111](#), [120](#), and [121](#)).
- Mearns, L. (2013). *The Computational Analysis of Harmony in Western Art Music*. PhD thesis, University of London. (Citado en las páginas [8](#), [10](#), [12](#), and [13](#)).
- Meredith, D. (1993). Computer-aided comparison of syntax systems in three piano pieces by Debussy. *Contemporary Music Review*, 9(1-2):285–304. (Citado en la página [11](#)).
- Meredith, D. (1996). *The Logical Structure of an Algorithmic Theory of Tonal Music*. Unpublished thesis. [www.titanmusic.com/papers/public/thesis1996.pdf](http://www.titanmusic.com/papers/public/thesis1996.pdf). (Citado en la página [104](#)).
- Meredith, D. (2006a). *Computing Pitch Names in Tonal Music: A Comparative Analysis of Pitch Spelling Algorithms*. PhD thesis, Oxford University, UK. (Citado en las páginas [1](#) and [116](#)).
- Meredith, D. (2006b). The ps13pitch spelling algorithm. *Journal of New Music Research*, 35(2):121–159. (Citado en la página [19](#)).
- Meyer, L. (1956). *El estilo en la m´usica*. (Citado en las páginas [43](#) and [47](#)).
- Mitchell, D. (1972). *El lenguaje de la m´usica moderna*. (Citado en la página [47](#)).
- Mouton, R. and Pachet, F. (1995). The Symbolic vs. Numeric Controversy in Automatic Analysis of Music. In *Proceedings of the Workshop on Artificial Intelligence and Music (IJCAI 1995)*, pages 32–39. (Citado en las páginas [11](#) and [12](#)).
- Narmour, E. (1992). *The analysis and cognition of melodic complexity: the implication-realization model*. (Citado en la página [47](#)).
- Nottebohm, G. (1865). *Ein Skizzenbuch von Beethoven*. (Citado en la página [35](#)).
- Pachet, F. (1991). A Meta-Level Architecture Applied to the Analysis of Jazz Chord Sequences. In *Proceedings of the International Computer Music Conference*, pages 1–4, Montreal. (Citado en la página [12](#)).
- Pachet, F. and Roy, P. (2000). Musical Harmonization with Constraints: A Survey. *Constraints*, 6(1):7–19. (Citado en la página [1](#)).
- Pardo, B. and Birmingham, W. (2002). Algorithms for chordal analysis. *Computer Music Journal*, 26(2):27–49. (Citado en las páginas [11](#), [12](#), [13](#), and [15](#)).
- Pardo, B. and Birmingham, W. P. (2000). Automated Partitioning of Tonal Music. *FLAIRS Conference*, pages 23–27. (Citado en la página [11](#)).
- Passos, A., Sampaio, M., Kröger, P., and de Cidra, G. (2009). Functional Harmonic Analysis and Computational Musicology in Rameau. In *12th Brazilian Symposium on Computer Music (SBMC)*. (Citado en las páginas [12](#) and [14](#)).

- Pérez-García, T., Iñesta, J. M., Ponce de León, P. J., and Pertusa, A. (2011). A multimodal music transcription prototype. In *Proc. of AMC Int. Conference on Multimodal Interaction, ICMI 2011*, pages 315–318, Alicante. (Citado en la página [112](#)).
- Pérez-Sancho, C., Rizo, D., and Iñesta, J. M. (2009). Genre classification using chords and stochastic language models. *Connection Science*, 21(2,3):145–159. (Citado en la página [1](#)).
- Phon-Amnuaisuk, S., Smaill, A., and Wiggins, G. (2006). Chorale harmonization: A view from a search control perspective. *Journal of New Music Research*, 35(4):279–305. (Citado en la página [14](#)).
- Piston, W. (1987). *Harmony*. W. W. Norton & Company, 5th edition edition. (Citado en la página [13](#)).
- Prather, R. (1996). Harmonic Analysis from the Computer Representation of a Musical Score. *Commun. ACM*, 39(12es):239–255. (Citado en la página [12](#)).
- Quinlan, J. R. (2014). *C4.5: Programs for Machine Learning*. Elsevier. (Citado en las páginas [105](#), [115](#), and [120](#)).
- Raczyński, S., Fukayama, S., and Vincent, E. (2013). Melody Harmonization With Interpolated Probabilistic Models. *Journal of New Music Research*, 42(3):223–235. (Citado en la página [1](#)).
- Radicioni, D. and Esposito, R. (2007). *Tonal Harmony Analysis: A Supervised Sequential Learning Approach*, pages 638–649. (Citado en las páginas [12](#) and [15](#)).
- Rameau, J. (1722a). *Traité de l’harmonie réduite et ses principes naturels, Ballard*. (Citado en las páginas [27](#) and [28](#)).
- Rameau, J. P. (1722b). *Traite de L’harmonie réduite ci son principe naturel*. (Citado en la página [32](#)).
- Ramirez, R. and Hazan, A. (2006). A Tool for Generating and Explaining Expressive Music Performances of Monophonic Jazz Melodies. *International Journal on Artificial Intelligence Tools*, 15:673–691. (Citado en la página [105](#)).
- Ramírez, R., Perez, A., Kersten, S., Rizo, D., Roman, P., and Iñesta, J. M. (2010). Modeling violin performances using inductive logic programming. *Intelligent Data Analysis*, 14(5):573–585. (Citado en la página [1](#)).
- Raphael, C. and Nichols, E. (2008). Training Music Sequence Recognizers with Linear Dynamic Programming. In *Proc. Int. Workshop on Machine Learning and Music (MML)*, Helsinki. (Citado en la página [13](#)).
-

- Raphael, C. and Stoddard, J. (2004). Functional harmonic analysis using probabilistic models. *Computer Music Journal*, 28(3):45–52. (Citado en las páginas 1, 7, 11, 12, and 13).
- Ratz, E. (1951). *Einführung in die musikalische Formenlehre: über Formprinzipien in den Inventionen und Fugen J. S. Bach und ihre Bedeutung für die Kompositionstechnik Beethovens*. (Citado en la página 41).
- Reicha, A. (1824). *Traité de haute composition musicale, 4eme. cahier*. (Citado en la página 30).
- Reti, R. (1965). *TonaTonal, atonatonal y pantonalidad*. (Citado en las páginas 5 and 43).
- Riemann, H. (1929). *Composición musical*. (Citado en las páginas 34 and 39).
- Rizo, D. (2010). *Symbolic music comparison with tree data structures*. PhD thesis, Universidad de Alicante. (Citado en la página 1).
- Rohrmeier, M. (2007). A generative grammar approach to diatonic harmonic structure. In *Proceedings of the 4th Sound and Music Computing Conference*, pages 97–100. (Citado en la página 12).
- Rohrmeier, M. (2011). Towards a generative syntax of tonal harmony. *Journal of Mathematics and Music*, 5(1):35–53. (Citado en la página 13).
- Rosen, C. (1980). *Formas de Sonata*. (Citado en la página 42).
- Rosen, C. (1986). *El estilo clásico Haynd, Mozart, Beethoven*. (Citado en la página 42).
- Rothgeb, J. E. (1969). Harmonizing the unfigured bass: A computational study. (Citado en la página 7).
- Rowell, L. (1985). *Introducción a la Filosofía en la M´úsica*. (Citado en la página 7).
- Rue, J. L. (1989). *Análisis del estilo musical*. (Citado en las páginas 46 and 47).
- Sabater, J., Arcos, J., and López de Mántaras, R. (1998). *Using Rules to support Case-Based Reasoning for harmonizing melodies*. AAAI Press. (Citado en la página 15).
- Salzer, F. (1983). *Heinrich Schenker and Historical Research: Monteverdi’s Madrigal Oimé, se tanto amate. Aspects of Schenkerian Analysis*. (Citado en la página 47).
- Sapp, C. (2007). Computational Chord-Root Identification in Symbolic Musical Data: Rationale, Methods, and Applications. *Tonal theory for the digital age*, page 99. (Citado en las páginas 11 and 13).
- Sapp, C. (2011). *Computational methods for the analysis of musical structure*. PhD thesis, Stanford University. (Citado en las páginas 8, 13, and 14).



- Scarborough, D. L., Miller, B. O., and Jones, J. A. (1989). Connectionist Models for Tonal Analysis. *Computer Music Journal*, 13(3):49. (Citado en la página 12).
- Schenker, H. (1906). *Harmonielehre (Neue musikalische Theorien und Phantasien)*. (Citado en las páginas 27, 28, 36, 37, and 39).
- Schoenberg, A. (1989). *Fundamentos de la composición musical*. (Citado en la página 40).
- Scholz, R., Dantas, V., and Ramalho, G. (2005). *Automating functional harmonic analysis: the Funchal system*. IEEE Press. (Citado en las páginas 11, 12, 13, and 14).
- Sechter, S. (1853). *Die richtige Folge der Grundharmonien oder vom Fundamentalbass und dessen Umkehrungen und Stellvertretern, von Simon Sechter*. (Citado en la página 32).
- Simon, I., Morris, D., and Basu, S. (2008). MySong: automatic accompaniment generation for vocal melodies. In *CHI '08: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 725–734, New York, New York, USA. ACM Request Permissions. (Citado en las páginas 1 and 14).
- Suzuki, S. and Kitahara, T. (2014). Four-part Harmonization Using Bayesian Networks: Pros and Cons of Introducing Chord Nodes. *Journal of New Music Research*, 43(3):331–353. (Citado en la página 1).
- Taube, H. (1999a). Automatic tonal analysis: Toward the implementación of a music theory workbench. *Computer Music Journal*, (23:4):18–32. (Citado en las páginas 15, 17, and 96).
- Taube, H. (1999b). Automatic Tonal Analysis: Toward the Implementation of a Music Theory Workbench. *Computer Music Journal*, 23(4):18–32. (Citado en las páginas 12, 13, and 14).
- Taube, H. and Burnson, W. A. (2008). Software for teaching music theory. Technical report, University of Illinois at Champaign-Urbana. (Citado en las páginas 2, 10, and 14).
- Temperley, D. (1997). An Algorithm for Harmonic Analysis. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 15(1):31–68. (Citado en la página 12).
- Temperley, D. (2001). *The Cognition of Basic Musical Structures*. The MIT Press. (Citado en las páginas 12, 13, and 112).
- Temperley, D. (2004). Bayesian Models of Musical Structure and Cognition. *Musicae Scientiae*, 8(2):175–205. (Citado en la página 1).
- Temperley, D. and Sleator, D. (1999a). Modeling Meter and Harmony: A Preference-Rule Approach. *Computer Music Journal*, 23(1):10–27. (Citado en las páginas 1, 7, and 12).
-

- Temperley, D. and Sleator, D. (1999b). Modeling meter and harmony: A preference-rule approach. *Computer Music Journal*, (23:1):10–27. (Citado en la página 15).
- Tojo, S., Oka, Y., and Nishida, M. (2006). Analysis of chord progression by HPSG. In *AIA'06: Proceedings of the 24th IASTED international conference on Artificial intelligence and applications*. ACTA Press. (Citado en la página 12).
- Toselli, A. H., Vidal, E., and Casacuberta, F. (2011). *Multimodal Interactive Pattern Recognition and Applications*. Springer. (Citado en las páginas 111 and 112).
- Tovey, D. (1931). *A Companion to Beethoven's Pianoforte Sonatas (Bar-to-Bar Analysis)*. (Citado en la página 41).
- Tracy, M. S. (2013). *Bach in Beta: Modeling Bach Chorales with Markov Chains*. PhD thesis, Harvard University. Applied Mathematics. (Citado en la página 8).
- Tsui, W. (2002a). *Harmonic analysis using neural networks*. PhD thesis, University of Toronto. (Citado en las páginas 12 and 15).
- Tsui, W. (2002b). *Harmonic analysis using neural networks*. PhD thesis, University of Toronto. (Citado en la página 13).
- Ulrich, J. W. (1977). The analysis and synthesis of jazz by computer. In *Proceedings of the 5th international joint conference on Artificial intelligence (IJCAI)*. Morgan Kaufmann Publishers Inc. (Citado en las páginas 1 and 11).
- Weber, G. (1817). *Versuch einer geordneten Theorie der Tonsetzkunst*. (Citado en la página 31).
- Willingham, T. J. (2013). *The harmonic implications of the non-harmonic tones in the four-part chorales of Johann Sebastian Bach*. PhD thesis, Liberty University, Liberty University. (Citado en las páginas 8 and 13).
- Winograd, T. (1968). Linguistics and the Computer Analysis of Tonal Harmony. *Journal of Music Theory*, 12:2–49. (Citado en las páginas 7, 11, 12, and 13).
- Yi, L. and Goldsmith, J. (2007). Automatic Generation of Four-part Harmony. *BMA 2007*. (Citado en la página 13).
- Zarlino, G. (1558). *The art of counterpoint*. (Citado en la página 27).

Reunido el Tribunal que suscribe en el día de la fecha acordó otorgar, por a  
la Tesis Doctoral de D. Plácido Román Illescas Casanova la calificación de .

Alicante de de

El Secretario,

El Presidente,

**UNIVERSIDAD DE ALICANTE  
CEDIP**

La presente Tesis de D. Plácido Román Illescas Casanova ha sido registrada con el nº

\_\_\_\_\_

del registro de entrada correspondiente.

Alicante \_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_

El Encargado del Registro,