



Universidad Distrital Francisco José de Caldas

---

FACULTAD DE ARTES ASAB  
Proyecto Curricular Artes Musicales

# Simbiosis 1.0

Composición para Bandola Andina  
Colombiana y Entidades Sónicas

Eddie Jonathan García Borbón



Bogotá, D.C., Agosto, 2017

# **Simbiosis 1.0**

## **Composición para Bandola Andina Colombiana y Entidades Sónicas**

**Eddie Jonathan García Borbón**

Código: 20111098012

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:  
**Maestro en Artes Musicales con Énfasis en Composición y Arreglos**

Director:  
Maestro Luis Fernando Sánchez Gooding

Línea de Investigación:  
Estética y Teorías del Arte  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Facultad de Artes ASAB  
Proyecto Curricular Artes Musicales  
Bogotá, D.C., Agosto, Colombia  
2017

*Dedico este trabajo de grado a todos los autómatas programados y por programar;  
Y a todos los científicos, teóricos, ingenieros, filósofos, poetas, artistas y músicos que  
han dedicado su investigación a la inteligencia artificial,  
sin sus búsquedas, aportes e invenciones no hubiese sido posible el presente proyecto de  
investigación-creación.*



# Agradecimientos

---

*a mi familia, y en especial a mis padres  
Juan Ricardo García Garzón y Dora Cristina Borbón,  
por su apoyo incondicional.*

*al maestro Luis Fernando Sanchez Gooding, tutor de esta investigación,  
por su idoneidad en el tema de investigación con la cual me supo  
orientar y guiar en todo el proceso de investigación y creación.*

*al maestro Juan Sebastian Vera, quien desde su instrumento  
aportó para la primera versión de Simbiosis,  
por medio de su interpretación en la Bandola Andina Colombiana.*

*a los maestros de La Universidad Distrital Francisco José de Caldas,  
Facultad de Artes ASAB,  
y especialmente a los Maestros: Guillermo Bocanegra  
por depositar su confianza en mi, mediando como gestor financiero  
para el apoyo brindado por la universidad por medio del CIDC  
(Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico)*

*"Apoyo para el desarrollo de trabajos de grado  
en las modalidades Investigación-innovación,  
y/o creación o interpretación de estudiantes de pre-grado."  
Convocatoria la cual fue merecedora del apoyo el presente proyecto de investigación-creación.*

*Y al Maestro Juan Diego Gómez,  
por permitirme hacer parte de su grupo de investigación:  
"Grupo de Investigación en el Área de Armonía"*

*a los Jurados a Juan Camilo Vázquez y Daniel Leguizamon  
por dedicar su tiempo a la lectura del presente texto.*

*a la comunidad de Pure Data,  
la cual por medio de la filosofía open source  
permite que el desarrollo del conocimiento  
independientemente de las fronteras, factores sociales,  
culturales, políticos y económicos.*

*a la comunidad de L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X,  
la cual permite que la edición de estos textos sean de alta calidad.*





Usted es libre de compartir, copiar, distribuir y comunicar

públicamente la obra bajo las condiciones siguientes:

**Atribución** — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciente (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).

**No comercial** — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

**Con obras derivadas** — se permite a otros distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir de tu obra de modo no comercial, siempre y cuando te den crédito y licencien sus nuevas creaciones bajo las mismas condiciones..

Entendiendo que:

**Dominio público** — Cuando la obra o alguno de sus elementos se halle en el dominio público según la ley vigente aplicable, esta situación no quedar? afectada por la licencia.

**Otros derechos** — Los derechos siguientes no quedan afectados por la licencia de ninguna manera:

- Los derechos derivados de usos legítimos u otras limitaciones reconocidas por ley no se ven afectados por lo anterior.
- Los derechos morales del autor.
- Derechos que pueden ostentar otras personas sobre la propia obra o su uso, como por ejemplo derechos de imagen o de privacidad.

**Aviso** — Al reutilizar o distribuir la obra, deben figurar claramente los términos de la licencia de esta obra. La mejor forma de hacerlo es enlazar a la página <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/>.

Por la presente declaro que, salvo cuando se haga referencia específica al trabajo de otras personas, el contenido de esta tesis es original y no se ha presentado total o parcialmente para su consideración para cualquier otro título o grado en esta o cualquier otra Universidad. Esta tesis es resultado de mi propio trabajo y no incluye nada que sea el resultado de algún trabajo realizado en colaboración, salvo que se indique específicamente en el texto.


Eddie Jonathan García Borbón, Bogotá D.C., 2017





## Resumen

---


imbiosis 1.0 es una composición para Bandola Andina Colombiana y Entidades Sónicas, con la posibilidad de hacer uso de otros instrumentos gracias a la flexibilidad del sistema programado en donde se aplican algunos conceptos y técnicas de la inteligencia artificial, la computación evolutiva y estrategias bio-inspiradas, es decir mecanismos de programación basados o inspirados en procesos de evolución y selección biológica. El presente proyecto extrapola el concepto *simbiosis* en una composición musical, con el fin de explorar las relaciones que pueden surgir entre un intérprete humano y la máquina, en este caso una población de entidades sónicas autónomas, en las cuales hay una programación que facilita la autonomía, la indeterminación, la toma de decisiones y los procesos que permiten la evolución, hibridación y mutación del material sonoro. Esta *relación simbiótica* es determinada, controlada y/o direccionada por un director/intérprete (mentor) en tiempo real por medio de un mecanismo de control. Finalmente, se plantean reflexiones en torno a la relación entre el ser humano y la máquina en un ecosistema sonoro, debatiendo el aporte que puede tener la creatividad artificial tanto para el compositor como para el intérprete.

*Palabras clave:* Computación evolutiva, electrónica evolutiva, composición algorítmica, Relaciones simbióticas, entidades sónicas.



## Abstract

---

ymbiosis 1.0 Symbiosis 1.0 is a composition for Colombian Andean Bandola and Sonic Entities, with the possibility of making use of other instruments thanks to the flexibility of the programmed system, where some concepts and techniques of artificial intelligence, evolutionary computation and bio-inspired strategies are applied, that is to say programming mechanisms based on the processes of evolution and biological selection. The present project aims to extrapolate the concept *symbiosis* in a musical composition, in order to explore the relationships that can arise between a human interpreter and the machine, in this case a population of autonomic sonic entities, in which there is a programming that facilitates autonomy, indeterminacy, decision making and processes, that allows the evolution, hybridization and mutation of sound material. This *symbiotic relationship* is determined, controlled and / or addressed by a real-time director / interpreter by means of a control mechanism. Finally, reflections on the relationship between the human being and the machine in a sound ecosystem are discussed, debating the contribution that artificial creativity can have both to the composer and to the interpreter.

*Keywords:* Evolutionary computing, evolutionary electronics, algorithmic composition, symbiotic Relations, sonic Entities.

# Índice general

---

<b>Índice de figuras</b>	xv
<b>Índice de tablas</b>	xvii
<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>1. Fundamentos teóricos del sistema Simbiosis</b>	<b>5</b>
1.1. Aspectos básicos de la inteligencia artificial . . . . .	6
1.2. Métodos de IA usados . . . . .	9
1.2.1. Computación evolutiva . . . . .	10
1.2.1.1. Genotipo y fenotipo . . . . .	10
1.2.1.2. Algoritmo genético . . . . .	11
1.2.1.3. Función de aptitud . . . . .	14
1.2.1.4. Función de aptitud y caminata aleatoria . . . . .	14
1.3. Teoría de conjuntos . . . . .	15
1.3.1. Spectra . . . . .	16
1.3.2. Métrica euclidiana en $\mathbb{R}^6$ . . . . .	18
1.3.3. Distancia angular en $\mathbb{R}^6$ . . . . .	19
1.4. Teoría de grafos . . . . .	20
1.4.1. Aplicaciones en música . . . . .	20
1.4.1.1. Relaciones armónicas . . . . .	20
1.4.1.2. Relaciones melódicas . . . . .	25
1.5. Teoría de la probabilidad . . . . .	27
1.5.1. Cadenas de Márkov ocultas . . . . .	28
1.6. Espectro / tipo - morfología . . . . .	30
1.6.1. Tipología del movimiento . . . . .	30
1.6.1.1. Unidireccional y bidireccional . . . . .	31
1.6.1.2. Recíproco . . . . .	31
1.6.1.3. Céntrico / cíclico . . . . .	31

1.6.1.4. Excéntrico / multidireccional . . . . .	31
1.7. Esqueleto del tiempo . . . . .	32
1.8. Síntesis por Modelado Físico . . . . .	33
1.8.1. Algoritmo Karplus-Strong . . . . .	34
1.9. Estudio técnico de la bandola . . . . .	34
1.10. Fuentes aparentes de ambientes virtuales . . . . .	40
<b>2. Proceso compositivo, parámetros técnicos y estructurales del sistema Sim-</b>	
<b>    biosis</b>	<b>42</b>
2.1. Estructura del Sistema . . . . .	42
2.2. Entidades sónicas . . . . .	45
2.3. Parámetros y procesos de estructuración musical . . . . .	46
2.3.1. Estructura formal de la obra y <i>performance</i> . . . . .	46
2.3.2. Universos armónicos - módulo armónico . . . . .	47
2.3.3. Tipología del movimiento - módulo melódico . . . . .	53
2.3.4. Esqueleto del tiempo - módulo rítmico . . . . .	58
2.3.5. Envoltente acústica - módulo genético . . . . .	60
2.3.6. Espacio virtual - módulo biotopo y efectos . . . . .	63
2.4. Interfaz de usuario instrumentista . . . . .	66
2.5. Dispositivos de control . . . . .	68
<b>Conclusiones</b>	<b>69</b>
Implicaciones de la creatividad artificial . . . . .	69
Modelos Bio-inspirados . . . . .	70
Aplicaciones de las Matemáticas en Música . . . . .	71
Programar es meta-componer . . . . .	71
Ideas para futuras investigaciones y/o creaciones . . . . .	71
<b>Bibliografía</b>	<b>73</b>
<b>A. Partitura Simbiosis 1.0</b>	<b>89</b>
<b>B. Código</b>	<b>93</b>
B.1. Código para calcular SPECTRA . . . . .	93
B.2. Código para calcular métrica euclídea . . . . .	93
B.3. Código para calcular distancia angular . . . . .	94

<b>C. Definiciones Matemáticas</b>	<b>95</b>
C.1. Teoría de Conjuntos . . . . .	95
C.1.1. Distancia angular . . . . .	95
C.2. Teoría de Grafos . . . . .	95
C.2.1. Definición Formal . . . . .	95

## Índice de figuras

---

1.1. <i>The Repast 3 System</i> . . . . .	8
1.2. Taxonomía de los métodos de inteligencia artificial aplicados a la composición algorítmica . . . . .	9
1.3. Genotipo y fenotipo musical . . . . .	10
1.4. Diagrama de flujo de un algoritmo genético . . . . .	11
1.5. Genoma del motivo de <i>All of Me</i> . . . . .	11
1.6. Mutaciones en el genoma de <i>All of Me</i> . . . . .	12
1.7. Recombinación (cruce de tres puntos) entre dos genomas . . . . .	13
1.8. Caminata aleatoria . . . . .	15
1.9. Correlación de los elementos 1,3,5 . . . . .	16
1.10. Grafo del universo armónico <i>El Tambo</i> . . . . .	23
1.11. Diferentes relaciones armónicas de <i>El Tambo</i> . . . . .	24
1.12. Ejemplo de segregación de flujo . . . . .	25
1.13. Segregación de flujo en <i>Klavierstücke</i> . . . . .	26
1.14. Cadena de Márkov de multifónicos en el clarinete . . . . .	27
1.15. Parametros probabilísticos de un modelo oculto de Márkov . . . . .	28
1.16. Ejemplo de cadena de Márkov oculta con base en los elementos básicos del sistema ritmo-armónico de las músicas andinas occidentales . . . . .	29
1.17. Tipología del movimiento . . . . .	30
1.18. Esqueleto del tiempo . . . . .	32
1.19. Cadena de Márkov de la canción <i>Julia, Julia, Julia</i> . . . . .	33
1.20. Implementación del algoritmo Karplus Strong . . . . .	34
1.21. Registro y afinación de la bandola andina colombiana . . . . .	34
1.22. Configuración de altavoces que definen espacio ilusorio y espacio de escucha . . . . .	40
1.23. Ejemplos de particularización de la ecuación 1.4 . . . . .	41
2.1. Estructura del sistema <i>Simbiosis</i> . . . . .	43
2.2. Funcionamiento de una entidad sónica . . . . .	45

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

2.3. Tipología espectral . . . . .	47
2.4. Escala octatónica . . . . .	47
2.5. Grafo escala octatónica . . . . .	48
2.6. Grafo escala octatónica con una restricción de 0° a 11°. . . . .	49
2.7. Grafo escala octatónica con una restricción de 80° a 90°. . . . .	50
2.8. Algunas posibilidades de conexiones en el grafo escala octatónica con una restricción de 8° a 14° . . . . .	51
2.9. GUI interfaz de usuario del módulo armónico . . . . .	52
2.10. Permutaciones de una melodía ascendente . . . . .	53
2.11. Ejemplo de una melodía ascendente . . . . .	54
2.12. Ejemplo melodía parabólica . . . . .	54
2.13. Ejemplo melodía movimiento centrífugo . . . . .	54
2.14. Ondulación melódica . . . . .	54
2.15. Convergencia melódica . . . . .	55
2.16. Expansión melódica . . . . .	55
2.17. Estructura matriz de <i>Toeplitz</i> . . . . .	55
2.18. Interfaz de usuario GUI del módulo melódico, en Pure Data . . . . .	56
2.19. Cadena de Márkov tipología del movimiento . . . . .	57
2.20. Interfaz de usuario GUI del módulo rítmico . . . . .	59
2.21. Cadena de Márkov del módulo rítmico con restricciones . . . . .	59
2.22. Crossover de 3 puntos en envolvente acústica ADSR. . . . .	60
2.23. Envolventes acústicas . . . . .	61
2.24. Caminata aleatoria en la envolvente acústica . . . . .	61
2.25. Caminata aleatoria en la envolvente acústica . . . . .	62
2.26. Espacio virtual - biotopo . . . . .	63
2.27. Abstracción geométrica de los efectos . . . . .	64
2.28. Detalle del funcionamiento de un efecto . . . . .	65
2.29. Interfaz de Usuario para el Instrumentista . . . . .	67
2.30. App partitura . . . . .	68
C.1. Diagrama del grafo G . . . . .	96



## Índice de tablas

---

1.1. Universo armónico de <i>El Tambo</i> . . . . .	20
1.2. Matriz de adyacencia de la canción el tambo . . . . .	21
1.3. SPECTRA de los acordes de <i>El Tambo</i> . . . . .	22
1.4. Distancia angular entre sonoridades de <i>El Tambo</i> . . . . .	22
1.5. Matriz de transición de la cadena de Márkov de multifónicos en el clarinete	28
1.6. Matriz de transición de la canción <i>Julia, Julia, Julia</i> del compositor Jorge Velosa . . . . .	33
1.7. Clasificación de las técnicas de la bandola andina colombiana. . . . .	35
2.1. Densidad del Grafo de la escala octatónica. . . . .	48
2.2. Tabla de proporciones rítmicas . . . . .	58
2.3. Efectos en serie y paralelo . . . . .	64



## Introducción

---

*With intelligences of different species and genera, there is the possibility at least of a symbiotic relationship, in which all will cooperate to learn how best to understand the laws of nature and how most benignly we might cooperate with them. Certainly, the cooperation will do better than any intelligence variety on its own.<sup>1</sup>*

Isaac Asimov, *Asimov's New Guide to Science*. (Asimov, 1984)

En mucha de la literatura de ciencia ficción ha habido sistemas informáticos de inteligencia artificial capaces de enfrentar procesos creativos o actividades que muchas veces se atribuyen como aptitudes netamente humanas, un ejemplo de ello es el holograma médico de emergencia de la serie *StarTrek: Voyager*, el cual debido a su programación adaptativa llegó a desarrollar gustos y habilidades para la dramaturgia, la fotografía, la ópera e incluso llegó a sostener relaciones románticas (Trek, 2016). Actualmente las investigaciones en el campo de la ciencia, la ingeniería y la computación se orientan hacia el estudio de las interacciones entre el ser humano y la máquina, aspirando a programar máquinas con un sentido del mundo, capaces de aprender y entender, esto con el fin de diseñar sistemas simbióticos que aumenten el rendimiento humano (Roy, 2004) Es por esto que el presente proyecto de investigación nace de la fascinación por la interacción entre el ser humano y la máquina, la composición musical algorítmica como estrategia para encontrar nuevas formas de creación y percepción del sonido; además del gusto por la programación, la Inteligencia Artificial (I.A.) y la ciencia.

Como antecedente a este proyecto es preciso mencionar a *Eden*, el sistema de vida artificial para la composición musical de Jon McCormack, el cual consiste en una ecología

---

<sup>1</sup> Con inteligencias de diferentes especies y géneros, existe la posibilidad por lo menos de una relación simbiótica, en que todos cooperarán en aprender a comprender mejor las leyes de la Naturaleza y la forma más benigna en que podamos cooperar con ellas. Ciertamente, la cooperación lo hará mucho mejor que cualquier otra variedad de inteligencia por sí misma.-Traducción Propia-

evolutiva de entidades sónicas que pueblan un mundo virtual y compiten por recursos. Dentro de su representación genética está la emisión y captación de sonido, *Eden* funciona en una red o matriz de dos dimensiones donde se distribuyen determinada cantidad de celdas, cada celda puede o bien ser roca, alimentos o entidades. Dichas entidades están dotadas de sensores con los cuales captan información de su entorno: nivel de energía de otras entidades, valor nutricional de los alimentos o información sonora. Además, las entidades pueden ejecutar diversas acciones, entre ellas están: desplazamiento por la matriz o cantar con determinadas características tímbricas. Las entidades sonoras también están dotadas de propiedades físicas tales como masa, velocidad y color, las cuales varían, mutan o cambian durante su vida (McCormack, 2001).<sup>I</sup>

Otro compositor que es importante citar es Eduardo Reck Miranda, quien implementó los autómatas celulares a la composición musical en su sistema denominado CAMUS, el cual emplea un modelo cartesiano para representar acordes de 3 sonidos (E. R. Miranda, 2001). Este sistema compuso piezas tales como *Entre l'Absurde et le Mystère* (para orquesta de cuerda)(E. R. Miranda, 2013) y el segundo movimiento de *Wee Batucada Scotica* (para cuarteto de cuerdas)<sup>II</sup>. CAMUS es la implementación de dos autómatas celulares: *juego de la vida* de John Conway<sup>III</sup> y *Demon Cyclic Space*. El *juego de la vida* es un conjunto de células que existen en 2 estados, vivos (sombreado) o muertos (en blanco). La regla de evolución predeterminada que se aplicará en cada paso de tiempo es que una célula viva seguirá viviendo en la siguiente etapa si tiene 3 ó 4 vecinos vivos, y una célula muerta cobrará vida si tiene precisamente 3 vecinos, de no tener ningún vecino morirán o si ya están muertas seguirían estándolo. (Gardner, 1970).

Teniendo en cuenta estos antecedentes, el objetivo del presente proyecto de investigación-creación es componer y estrenar una obra musical que explore las interacciones y/o relaciones simbióticas entre un intérprete humano y la máquina, a través de entidades sónicas autónomas, mediados por un tercer intérprete/director humano. Para lograr este objetivo se establecieron los siguientes objetivos secundarios: se programaron a dichas entidades sonoras con base en algoritmos genéticos y aprendizaje automático (*machine learning*). Se diseñó y programó una interfaz de control que permite la manipulación y direccionamiento de los parámetros de estructuración musical, los cuales fueron constituidos y programados por medio de módulos y, finalmente se exploró y experimentó con la simulación de fuentes

---

<sup>I</sup>En el siguiente link puede consultar la documentación en video de Eden: <https://vimeo.com/11032248>

<sup>II</sup>En el siguiente link puede ver la interpretación de *Wee Batucada Scotica* por el cuarteto "Leo String Quartet": <https://vimeo.com/55600019>

<sup>III</sup>Puede Ud. probar una simulación de este "Juego" en la siguiente pagina web: <http://www.bitstorm.org/gameoflife/>

aparentes en ambientes virtuales.

Al ser esta tesis un proyecto de investigación-creación, la metodología a emplear constó de tres etapas o fases; una primera etapa investigativa y/o pre-compositiva, a la cual le siguió una etapa creativa y finalizó con una etapa interactiva. En dichas etapas se ejecutaron diversas actividades y se hizo uso de algunas herramientas tales como: lectura y análisis de artículos y libros científicos, haciendo especial incidencia en el campo de la probabilidad, la teoría de conjuntos, la computación evolutiva y la inteligencia artificial, así como también lectura y análisis de libros y artículos teórico-musicales referentes a composición algorítmica electrónica evolutiva, simulación del espacio en música y aplicaciones de la computación evolutiva en música. Finalmente, el empleo de herramientas de programación musical como *pure data*, de la misma manera con herramientas empleadas en programación orientada a objetos como *Phyton*.

El eje de esta investigación son las estrategias bio-inspiradas y la computación evolutiva aplicadas a la composición musical, es decir, la programación basada en los procesos de evolución y selección natural, ampliamente desarrollado en lo que se denominan como algoritmos genéticos. Partiendo de ello, se formula la siguiente hipótesis:

La relación entre el ser humano y la máquina desde una perspectiva simbiótica posibilita un nuevo paradigma para comprender, concebir y percibir el sonido, lo cual nos permite llevarnos a situaciones creativas sustancialmente innovadoras, siendo fundamental el caos, el indeterminismo y la aleatoriedad.

Lo más relevante del presente proyecto de investigación-creación no son las técnicas concretas de las cuales se hace uso para el desarrollo del mismo, sino el enfoque conceptual, el paradigma al cual se perfila. En ese sentido se pretende explorar las relaciones e interrelaciones entre el ser humano y la máquina, los cuales están inmersos en un ambiente o ecosistema artificial sonoro. Adicionalmente, la interacción entre los participantes (entidades sonoras, intérprete y director), es fundamental para el presente proyecto de investigación-creación puesto que posibilita nuevas formas de comprender, concebir y percibir el sonido, al contrario de la gran mayoría de trabajos en música que abordan la inteligencia artificial, que siempre aíslan las entidades sonoras sin permitir que el ser humano interactúe con ellas.

Por otro lado, en el presente proyecto de investigación-creación los atributos o el genotipo de las entidades sonoras no son representados como alturas ni ritmo, ya que estas

dos constituyen procesos; el genotipo de las entidades sonoras es asociado a la envolvente acústica. Asimismo, no se pretende un tipo de inteligencia artificial imitativa de estilos, sino más bien se pretende desencadenar nuevas formas de concebir el sonido.

Complementario a lo anterior es esencial entender el papel del director/intérprete, el cual se conceptualiza como un nuevo integrante o elemento en el performance musical; el director/intérprete, es capaz de controlar procesos estructurales de la obra en tiempo real. Además, las entidades sonoras están dotadas de movimiento, pero estas no se mueven en una malla o red cuadrada, sino que su movimiento describe funciones de ecuaciones polares, lo cual está descrito en la sección 1.10.

Puesto que la obra se concibe desde las interrelaciones entre individuos y sociedad, es preciso resaltar que todo ello nace de la filosofía *Open Source* (código abierto) en la cual todo el mundo puede contribuir, leer, modificar y redistribuir el código fuente de algún programa. Para este caso se hace uso del lenguaje de programación *Pure Data* el cual es de código abierto. Finalmente, el aplicar técnicas de inteligencia artificial al proceso de creación y/o composición musical tiene como objetivo incentivar la formación integral y el desarrollo de competencias, a partir de la incursión en otras áreas del conocimiento que no son propias del estudio en música.

Este trabajo está dividido en 4 partes; la primera (primer capítulo) corresponde al marco teórico, el cual hace referencia a todos los conceptos, libros, investigaciones y obras que fueron fundamentales para el desarrollo del presente proyecto de investigación-creación. La segunda parte corresponde al marco metodológico en el cual se encuentran descritos los parámetros técnicos y estructurales de la obra y del sistema *Simbiosis*. Posteriormente, a este capítulo le sigue una tercera parte en donde se detallan las reflexiones y conclusiones en torno a lo explorado en el proceso de programación, composición e interacción y se establece el marco para futuras investigaciones. Finalmente, la cuarta parte corresponde al apéndice, el cual contiene toda la documentación del código programado en los distintos lenguajes y algunas definiciones matemáticas necesarias para comprender en detalle algunos conceptos tratados en este trabajo.

## Fundamentos teóricos del sistema *Simbiosis*

---

*Si suponemos que la acción del cerebro humano, consciente o no, consiste simplemente en la ejecución de algún algoritmo muy complicado, entonces debemos preguntar cómo se formó un algoritmo de eficacia tan extraordinaria. La respuesta normal, por supuesto, sería que surgió por "selección natural". Por lo que respecta a las criaturas con cerebros evolucionados, aquellos con los algoritmos más eficaces tendrían más probabilidades de sobrevivir y por ello, en general, tendrían más progenie. Esta progenie también tendería a portar algoritmos más eficaces que sus primos, puesto que heredaron de sus padres los ingredientes de estos mejores algoritmos; de este modo los algoritmos mejoraron poco a poco no necesariamente de manera uniforme puesto que pudo haber tropiezos importantes en su evolución hasta que alcanzaron el importante estado que (aparentemente) encontramos en el cerebro humano.<sup>1</sup>*

Dawkins (1986) El relojero ciego.

En este capítulo se explican y desarrollan conceptos teóricos que fueron determinantes para la composición de *Simbiosis*. En primer lugar se definen algunos conceptos básicos y los métodos de la Inteligencia Artificial (en adelante IA) que fueron sustento para idear y concebir las entidades sónicas. Posteriormente, se puntualiza en algunos conceptos de la teoría de conjuntos, la teoría de grafos y la teoría de la probabilidad, que fueron la base para el diseño del sistema armónico, rítmico y melódico. También, se explican algunos conceptos teórico-musicales de los cuales se partió para estructurar los procesos musicales presentes en la obra. En seguida, se detalla el tipo de síntesis usado en el proyecto, un estudio técnico del instrumento usado en la primera versión de *Simbiosis* y, finalmente, se realiza una breve exposición en torno a la simulación de fuentes aparentes en ambientes virtuales y su movimiento en el espacio.

---

<sup>1</sup>Traducción extraída de "La mente nueva del emperador, en torno a la cibernética, la mente y las leyes de la física" de Penrose (1999)

## 1.1. Aspectos básicos de la inteligencia artificial

*I Propose to consider the question, 'Can machines think?' This should begin with definitions of the meaning of the terms 'machine' and 'think'.<sup>1</sup>*

A. Turing (1950)

Puesto que el presente proyecto de investigación-creación pretende aplicar ciertos métodos y ramas de la IA a la composición musical, es preciso definir y analizar ciertos conceptos que son fundamentales para el desarrollo, comprensión y juicio del proyecto. Análogo a la pregunta de Alan Turing, ¿pueden las máquinas pensar?, nos concierne preguntarnos ¿pueden las máquinas ser creativas?, del mismo modo que el planteamiento de Turing, es conveniente comenzar por definir conceptualmente términos tales como IA, máquina y vida artificial, antes de abordar las ramas y métodos de los cuales se hace uso en el presente proyecto.

Es imprescindible delimitar el concepto de inteligencia antes de abordar cualquier otro campo, es por esto que considero pertinente mencionar a Kurzweil, quien dice lo siguiente: *My view is that intelligence is the ability to use optimally limited resources—including time—to achieve such goals. There is a plethora of other definitions. One of my favorites is by R. W. Young, who defines intelligence as "that faculty of mind by which order is perceived in a situation previously considered disordered".* <sup>11</sup>Kurzweil (2000).

Otra definición que me parece plausible es la de James Albus, quien afirma lo siguiente: *I believe that understanding intelligence involves understanding how knowledge is acquired, represented, and stored; how intelligent behavior is generated and learned; how motives, and emotions, and priorities are developed and used; how sensory signals are transformed into symbols; how symbols are manipulated to perform logic, to reason about the past, and plan for the future; and how the mechanisms of intelligence produce the phenomena of illusion, belief, hope, fear, and dreams - and yes even kindness and love*<sup>111</sup> (Albus, 1995; Nilsson, 1998).

---

<sup>1</sup>Propongo considerar la siguiente pregunta: "¿Pueden pensar las máquinas?". Se debería comenzar definiendo el significado de los términos 'máquina' y 'pensar'. -Traducción propia-

<sup>11</sup>Mi punto de vista es que la inteligencia es la habilidad de usar de forma óptima recursos limitados -incluyendo el tiempo- para lograr esas metas. Existe una plétora de otras definiciones, una de mis favoritas es de Fatmi y Young (1970), quien define a la inteligencia como "esa facultad de la mente por la cual es percibido el orden en una situación previamente considerada desordenada.

<sup>111</sup>Creo que la comprensión de la inteligencia consiste en la comprensión de cómo se adquiere el conocimiento, es representado, y se almacena; cómo el comportamiento inteligente es generado y aprendido; cómo motivos y emociones, y prioridades son desarrolladas y utilizadas; cómo señales sensoriales son trans-



Con base en las anteriores definiciones, se deduce que la IA corresponde al campo de la investigación que se orienta hacia descubrir y describir los aspectos de la inteligencia humana que pueden ser simulados computacionalmente (Jackson, 1985). Por otro lado, IA se refiere al comportamiento inteligente de artefactos o máquinas, lo que implica percepción, razonamiento, aprendizaje, comunicación y comportamiento en sistemas complejos (Nilsson, 1998).

También es importante conocer que existen varios niveles, categorías o tipos de IA<sup>1</sup> y que existen dos posturas filosóficas que se contraponen: por un lado está la que propone Searle, quien manifiesta que la IA nunca alcanzará autoconsciencia real y nunca sentirá un placer estético, a esto se le denomina *IA débil* (Searle, 2007); por otro lado está la *IA fuerte*, la cual dice que nuestra consciencia es producto de una computación y que la computación artificial conseguirá el mismo grado de percepción de sí misma que el ser humano. También manifiestan que la actividad mental se puede reducir a algoritmos; este argumento lo defienden autores tales como Hofstadter (2007), Minsky (1965) y Fodor (1983), y es en este punto en el cual las máquinas tomarán la iniciativa de crear arte (López-Montes, 2013).

Otro concepto que es imprescindible definir es *máquina*; por lo general esta palabra es asociada a engranajes, piezas de acero, circuitos, entre otros, si bien la definición de máquina según la RAE es: *Artificio para aprovechar, dirigir o regular la acción de una fuerza. Conjunto de aparatos combinados para recibir cierta forma de energía y transformarla en otra más adecuada, o para producir un efecto determinado. Agregado de diversas partes ordenadas entre sí y dirigidas a la formación de un todo* (RAE, 2016).

---

formadas en símbolos; cómo son manipulados estos símbolos para realizar una tarea lógica, para razonar sobre el pasado, y planificar el futuro; y cómo los mecanismos de inteligencia producen los fenómenos de ilusión, creencia, esperanza, miedo y sueños - y sí, incluso la bondad y el amor.

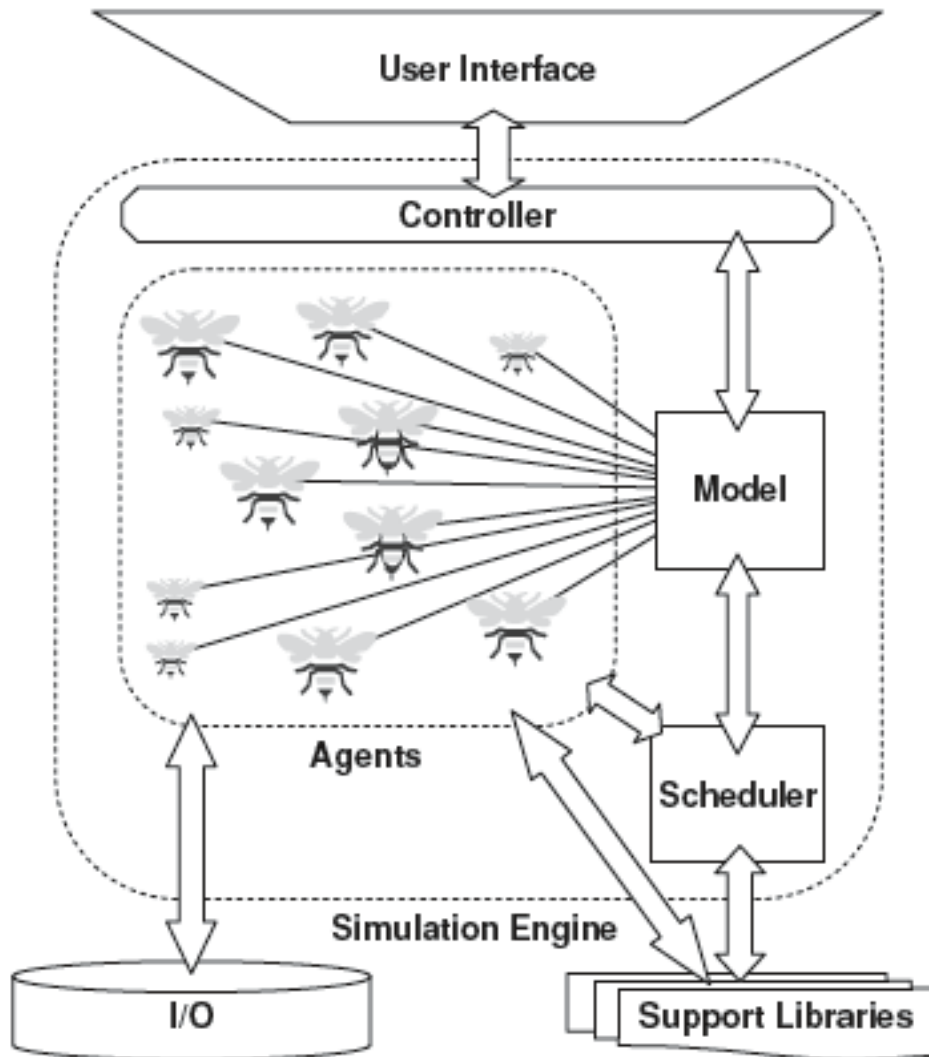
**Sistemas que piensan como humanos:** Este tipo de IA trata de imitar el pensamiento humano por medio de redes neuronales artificiales. Se enfoca en automatizar actividades tales como la toma de decisiones, la resolución de problemas y el aprendizaje (Bellman, 1978).

**Sistemas que actúan como humanos:** Estos sistemas imitan el comportamiento humano; por ejemplo la robótica y se enfoca en la automatización de actividades que implican movimiento y son rutinarias (Rich y Knight, 1991).

**Sistemas que piensan racionalmente:** Tratan de imitar o emular el pensamiento lógico racional del ser humano; por ejemplo los sistemas expertos (Winston, 1992).

**Sistemas que actúan racionalmente:** Tratan de imitar el comportamiento humano; por ejemplo los agentes inteligentes. Está relacionado con conductas inteligentes en las máquinas (Nilsson, 1998).

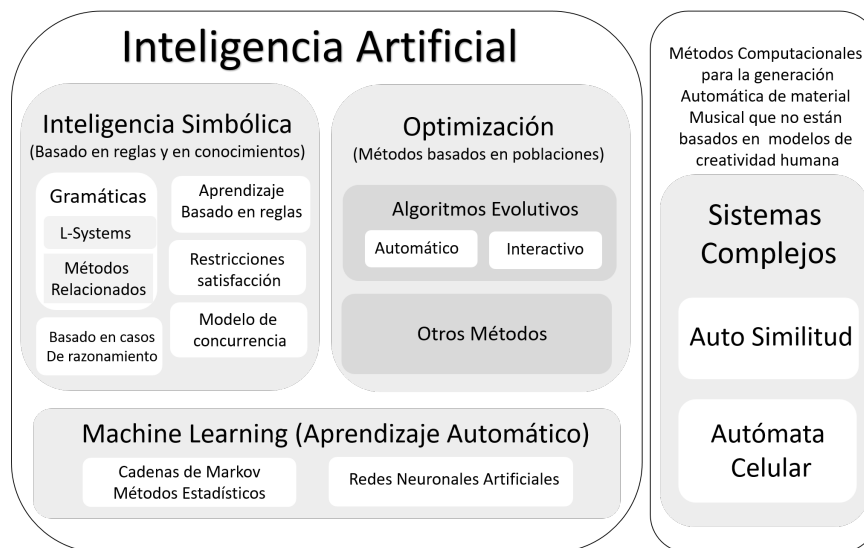
<sup>1</sup>De esta manera funcionan los ecosistemas sónicos descritos en el estado del arte.



**Figura 1.1:** Ejemplo de los componentes de un Sistema *A-life*, el cual se compone de un motor de simulación, sistemas de entrada y salida (I/O), interfaz de usuario y las bibliotecas de soporte. Los componentes están soportados en la capa de núcleo y son accedidos por el usuario en la capa externa. Imagen tomada de Adamatzky y Komosinski (2005).

## 1.2. Métodos de IA usados

Componer música implica una serie de actividades y procesos, los cuales pueden ser automatizados mediante el uso de computadoras; a esto se le denomina *composición algorítmica*. En consecuencia se han desarrollado varias técnicas computacionales vinculadas con la IA (Loy y Abbott, 1985) (Pope, 1993). Tres puntos de partida para la investigación del estado del arte de la música asistida por ordenador son *Computer Music Journal*<sup>I</sup>, *International Computer Music Conference*, organizada anualmente por la *International Computer Music Association*,<sup>II</sup> y en especial la que más compete al presente trabajo de investigación-creación por su enfoque en la computación evolutiva: *EvoMusart (Evolutionary and Biologically Inspired Music, Sound, Art and Design)*, organizada anualmente por *Evostar*<sup>III</sup> (McDermott y Correia, 2013). Algunos autores han realizado varias sistematizaciones y/o taxonomías de los métodos de IA usados en la composición algorítmica, entre los cuales están Nierhaus (2009), Papadopoulos y Wiggins (1999) y Fernández y Vico (2013), en donde destacan 4 grandes categorías: la inteligencia simbólica (basada en reglas o en conocimiento)<sup>IV</sup>, la optimización<sup>V</sup>, el aprendizaje automático (*Machine learning*) y los sistemas complejos.



**Figura 1.2:** Taxonomía de los métodos de IA aplicados a la composición algorítmica elaborado por Fernández y Vico (2013) y traducción propia.

<sup>I</sup>Revista disponible en <http://www.computermusicjournal.org/>

<sup>II</sup>Disponible en <http://quod.lib.umich.edu/i/icmc/>

<sup>III</sup>Disponible en [http://www.evostar.org/2015/cfp\\_evomusart.php](http://www.evostar.org/2015/cfp_evomusart.php)

<sup>IV</sup>Puede consultar Rowe (1992), Carpentier y Bresson (2010), Zimmermann (2001), Spangler (1999)

<sup>V</sup>Puede consultar Davismoon y Eccles (2010), Feulner y Hörnel (1994), Lehmann y Ram (s.f.)

## 1.2.1. Computación evolutiva

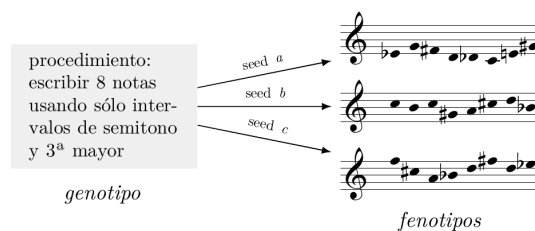
*I like to think (it has to be!) of a cybernetic ecology where we are free of our labors and joined back to nature, returned to our mammal brothers and sisters, and all watched over by machines of loving grace.<sup>1</sup>*

*All Watched Over by Machines of Loving Grace -Brautigan (1967)-*

La computación evolutiva (en adelante CE) es una de las ramas de la IA en donde se hace uso de la optimización combinatoria, inspirada en los mecanismos de evolución biológica y la genética planteados por Darwin (1888), la transmisión por herencia genética propuesta por Mendel (1996) y la transmisión de caracteres adquiridos expuestos por Lamarck (1847). Los procesos de búsqueda evolutiva (A. M. Turing, 1948), las estrategias de evolución (Rechenberg, 1994), los algoritmos genéticos (Holland, 1975), la programación evolutiva (Fogel y cols., 1995) y la programación genética (Koza, 1992) tienen en común que incluyen la reproducción, la variación azarosa, la competitividad y la selección de individuos que luchan en una población (De Jong y cols., 1997).

### 1.2.1.1. Genotipo y fenotipo

En biología, un genotipo es el conjunto de los genes que existen en el núcleo celular de un organismo. El fenotipo es la realización visible del genotipo cuyos caracteres son el resultado de la interacción entre el genotipo y el medio. Un genotipo musical es una expresión que codifica procedimientos musicales. Un fenotipo musical es el fragmento musical generado por un genotipo. Al igual que en biología, un genotipo musical puede dar lugar a muchos fenotipos diferentes, en función del medio (López-Montes, 2013).



**Figura 1.3:** Ejemplo de un genotipo musical el cual tiene 3 semillas<sup>11</sup> producen 3 fenotipos. Imagen tomada de (López-Montes, 2013).

<sup>1</sup>Me gusta imaginar (tiene que ser así) una ecología cibernética donde estamos libres de nuestros trabajos y unidos nuevamente a la naturaleza, retornando a lo mamífero hermanos y hermanas, y todos vigilados por máquinas de absoluta misericordia. -Traducción propia-

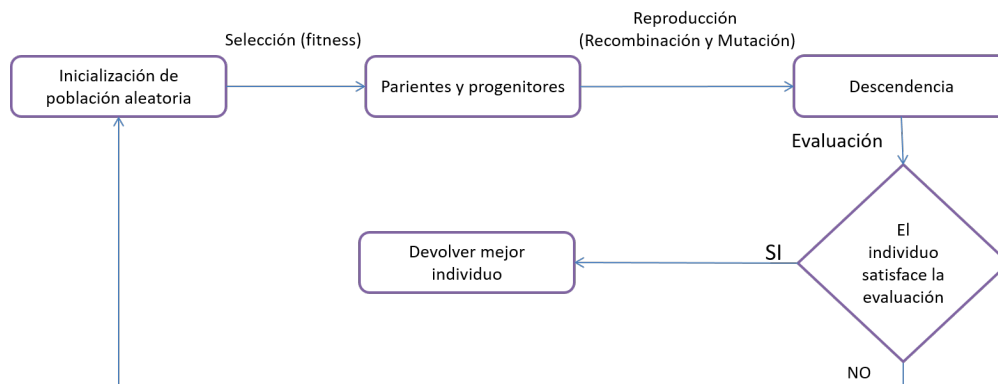
<sup>11</sup>Seed o semilla representa un argumento de un generador aleatorio el cual determina una secuencia de números (López-Montes, 2013).

### 1.2.1.2. Algoritmo genético

*Computer programs that “evolve” in ways that resemble natural selection can solve complex problems even their creators do not fully understand.<sup>1</sup>*

-Holland-

El algoritmo genético fue desarrollado por John Holland en 1960, quien se propuso estudiar el fenómeno biológico de adaptación en la naturaleza y trasladarlo a sistemas computacionales. Un algoritmo genético contiene los siguientes pasos:



**Figura 1.4:** Diagrama de flujo de un algoritmo genético, conceptualización realizada a partir de los esquemas propuestos por E. R. Miranda y Al Biles (2007) y Jensen (2011). Elaboración propia.

Lo anterior será ilustrado con la canción *All of Me* de John Legend

**Codificación (Encoding):** Como primer paso, codificamos el primer fragmento en un vector compuesto de duplas en donde el primer número representa la altura en MIDI y el segundo la duración en milisegundos.

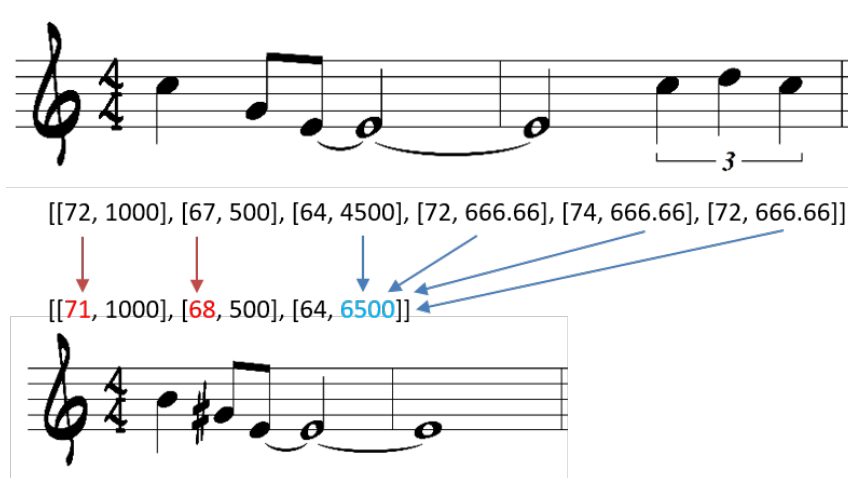


**Figura 1.5:** Genoma del motivo de *All of Me*, sección de la partitura extraída de Sher (1988). Elaboración Propia.

<sup>1</sup>Los programas informáticos que “evolucionan” en formas que se asemejan a la selección natural pueden resolver problemas complejos incluso sus creadores no entienden completamente.

**Generando variación:** Existen diversas formas de variación genética, las más usadas son expuestas a continuación.

1. **Mutación:** Consiste en reemplazar un elemento aleatorio del genotipo por otro elemento aleatorio en el mismo intervalo. En este caso nos referimos a Modificar la duración de una nota, modificar el tono de una nota, agregar o eliminar una nota a la melodía<sup>I</sup>, intercambiar dos notas<sup>II</sup>, clonar, interpolar, entre muchos otros más (Alfonseca y cols., 2007; Donnelly y Sheppard, 2011).



**Figura 1.6:** Mutaciones en el genoma del motivo de *All of Me*. Secciones de la partitura extraídas de Sher (1988). El color rojo indica mutación en la altura y el azul en el ritmo o duración. Se observa como la altura muta de un C a un B, en nota MIDI pasa de un 72 a 71. Por otro lado el ritmo muta al sumarse los valores de los 3 tresillos de negra mas las dos blancas ligadas a la corchea, es decir  $45000\text{ms} + 666.66\text{ms} + 666.66\text{ms} + 666.66\text{ms} = 65000\text{ms}$  Elaboración propia.

2. **Cruce o recombinación:** en este algoritmo los genotipos de ambos progenitores se combinan utilizando diferentes procedimientos para generar los genotipos progenie (Donnelly y Sheppard, 2011).
  - **Cruce Monopunto** (*Single point crossover*): se intercambia información genética a partir de un determinado punto.
  - **Cruce de doble punto** (*two-point crossover*): se intercambia el material genético comprendido entre dos puntos. Pueden existir también cruces de tres o mas puntos como el que se ilustra a continuación:

---

<sup>I</sup>A esto se le suele llamar Elisión.

<sup>II</sup>A esto se le suele llamar Swap.



**Figura 1.7:** Recombinación (cruce de tres puntos) entre dos genomas, la línea verde representa el genoma del padre, la línea negra el genoma de la madre. Al realizar una recombinación de tres puntos el hijo contiene información de la madre y del padre tal como lo ilustra la imagen. Elaboración propia

3. **Otras operaciones:** A continuación se describen otras operaciones que son usuales en la aplicación de algoritmos genéticos en música (Horner y Goldberg, 1991).

- Añadir: se agrega un elemento al genoma.
- Eliminar: se elimina un elemento del genoma.
- Rotación: se gira o invierte el genoma.
- Rotación incorrecta: se giran elementos en posiciones “incorrectas” del genoma. Se refiere a que los elementos de una lista de notas por ejemplo se rotan en una misma dirección.
- Intercambio incorrecto: se intercambian elementos en posiciones “incorrectas” del genoma. A diferencia del anterior en esta operación se intercambia la posición de dos o mas elementos en una lista

### 1.2.1.3. Función de aptitud

Una función de aptitud (*Fitness Function*) se utiliza para evaluar, por ejemplo, la calidad de las melodías generadas a partir del algoritmo anterior con respecto a la proximidad que tengan frente a un objetivo. Supongamos que ese objetivo sea ser agradables, coherentes y con sentido musical. Dado que los conceptos anteriores corresponden al plano subjetivo y estético, lo más coherente es que esta evaluación la haga un tutor o mentor humano, por lo tanto, después de cada ronda de pruebas, simulaciones o iteraciones en donde se van gestando poblaciones de melodías, el mentor humano eliminará las peores melodías y dejara las mejores (Ginés y cols., 2013; Jensen, 2011; E. R. Miranda y Al Biles, 2007). Para el caso del presente proyecto el mentor humano corresponde a la figura de director/interprete, quien ajustará o establecerá un óptimo aplicado a la envolvente acústica de las entidades sónicas. Lo anterior esta descrito en la sección 2.3.5.

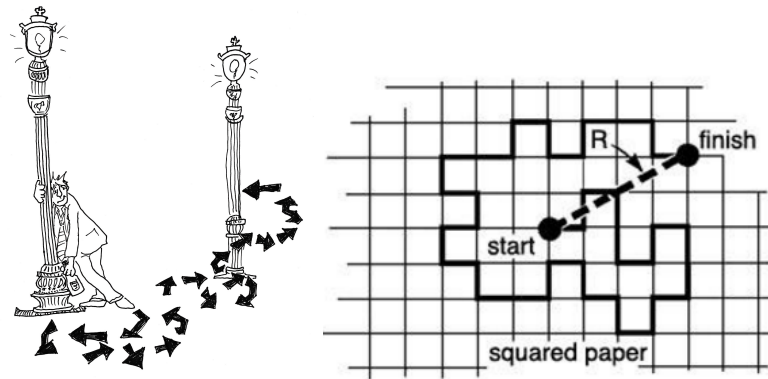
Es preciso destacar que existen tres categorías de función de aptitud:

1. Evaluación interactiva: *fitness* asignado por humanos (Biles, 1994).
2. Funciones de aptitud física: reglas basadas en la teoría musical o la experiencia (Dahlstedt, 2007; Papadopoulos y Wiggins, 1998).
3. Funciones de aptitud por medio de aprendizaje autónomo: redes neuronales artificiales (RNAs), aprendizaje automático (*Machine Learning*), modelos de Márkov (Bellinger, s.f.).

### 1.2.1.4. Función de aptitud y caminata aleatoria

Una *caminata aleatoria* es un proceso estocástico, el cual describe una trayectoria de pasos discretos o moderados al azar (Hughes, 1995; Révész, 2005; Whorley y Conklin, 2015). Una forma sencilla de entender lo que es una caminata aleatoria es por medio del ejemplo del borracho. Supongamos que un borracho quiere caminar de un punto A a un punto B, tal como lo ilustra la figura 1.8 en la parte izquierda, el punto de inicio A es el poste del lado izquierdo del cual esta sujetado el borracho, y el punto de llegada es el poste del lado derecho. Esta persona deambularía de forma aleatoria e impredecible por la calle y eventualmente llegará a su destino. En la parte derecha de la figura 1.8 se ilustra un posible recorrido de caminata aleatoria del borracho en dos dimensiones (Monte, 1999; Moore, 2007).





**Figura 1.8:** Ilustración de una caminata aleatoria por medio del ejemplo del borracho, imágenes extraídas de *Advanced Design Studies* (2017) y *Physics* (2017)

Los procesos de caminata aleatoria son útiles para generar fenómenos musicales que requieren de cambios suaves y graduales sobre determinado material <sup>I</sup> (E. Miranda, 2001). Para este caso la caminata aleatoria es usada en la función de aptitud, es decir; el director establece un óptimo en la envolvente acústica y las entidades sónicas poco a poco van mutando y orientándose por medio de pasos moderados o discretos hasta parecerse a la envolvente establecida por el director.

### 1.3. Teoría de conjuntos

La teoría de conjuntos aporta conceptos con los cuales se categorizan y relacionan objetos musicales, sus precursores fueron Howard Hanson (1960) y Allan Forte (1973).<sup>II</sup> Diversos autores han propuesto operaciones que miden la diferencia entre sonoridades; algunos de ellos son la similitud sobre el vector de clases interválicas IcVSIM (E. J. Isaacson, 1990), el índice de similitud (Teitelbaum, 1965), el ángulo entre vectores interválicos ANGLE (Scott y Isaacson, 1998), la medida euclidiana y la distancia angular (Callender, 2007).<sup>III</sup> A continuación se describen algunos conceptos y operaciones que fueron fundamentales para el desarrollo del sistema armónico del proyecto:

<sup>I</sup>Whorley y Conklin (2015) hacen uso de la caminata aleatoria como un modelo iterativo para la armonización a cuatro partes buscando una relación entre la entropía cruzada y la calidad de la armonización, con el fin de demostrar “violaciones” a las reglas generales del contrapunto.

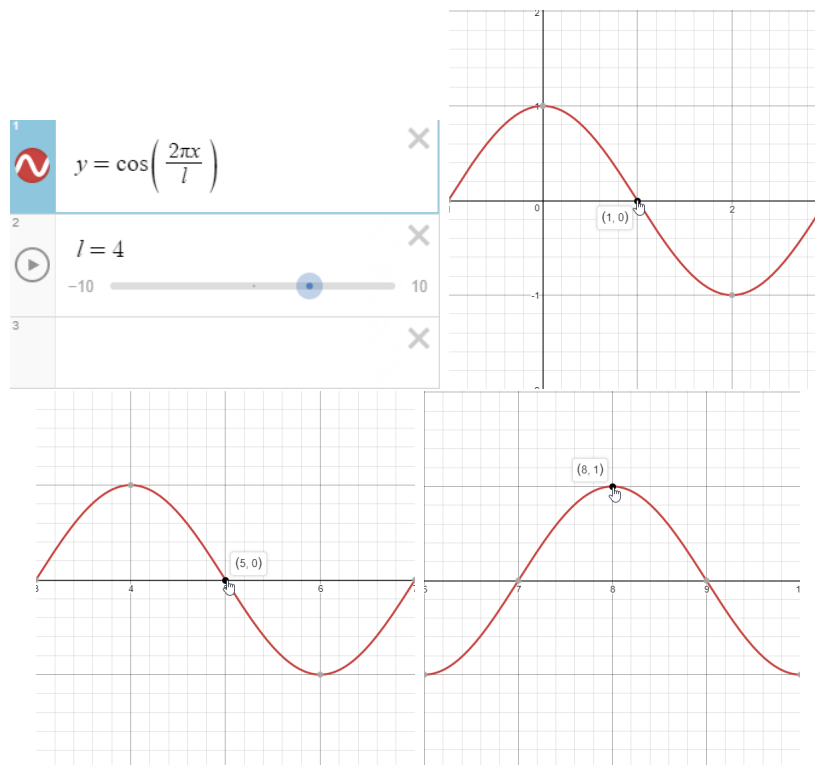
<sup>II</sup>Si no está familiarizado con esta teoría sugiero consultar:

<http://composertools.com/Theory/PCSets/>

<sup>III</sup>Otros autores que proponen que investigaron la distancia entre sonoridades son: Buchler (2000), Cohn (1991), Hall y cols. (2007), Lewin (1959), Straus (2003), Roeder (1987) y Tymoczko (2006)

### 1.3.1. Spectra

Callender desarrolló una generalización de la caracterización armónica para conjuntos de clases tónicas<sup>1</sup> en temperamento igual por medio del uso de la transformada de Fourier, gracias a esto podemos representar y cuantificar la naturaleza interválica del contenido armónico de cualquier acorde y localizarlo en un espacio armónico de todos los posibles "Spectra" (İzmirli, 2015). La caracterización armónica corresponde a la relación de equilibrio con respecto a x ciclo interválico en donde la magnitud de cada componente de un acorde o conjunto de notas es la representación de que tan lejos del equilibrio están sus elementos con respecto a un ciclo. Para comprender mejor lo anterior consideremos el conjunto [1, 5, 8], es decir el acorde [C#, F, G#] y evaluemos su correlación o equilibrio para el ciclo 4 (dividimos la octava en 4 partes), queriendo de esta manera representar que tan lejos están del equilibrio cada elemento (nota) del conjunto con respecto al ciclo 4 en la componente coseno.



**Figura 1.9:** Correlación de los elementos del conjunto 1,3,5 con respecto a la componente coseno el cual arroja el vector 0,0,1, gráficos elaborados con *Desmos*. Elaboración propia

<sup>1</sup>Una clase tónica corresponde al conjunto de todos los tonos musicales del mismo nombre, independientemente de la octava (Whittall, 2008).

Posterior a esto, se realiza una suma de la correlación de cada elemento del conjunto con respecto a las componentes seno y coseno, esto con el fin de comparar sonoridades o acordes entre si para determinar que tan "distantes" son (Amiot, 2007; Quinn, 2006; Vuza, 1991). A un acorde o sonoridad se le calcula la magnitud asociada a la transformada de fourier<sup>1</sup> (es decir la sumatoria de las componentes seno y coseno) haciendo uso del teorema de Pitágoras<sup>11</sup> por medio de la siguiente ecuación:

Magnitud de la transformada de Fourier de  $Q$  con frecuencia  $z$  extraída de Callender (2007)

$$|\mathcal{F}_q(z)| = \sqrt{\left(\sum_{q \in Q} \sin\left(\frac{2\pi z}{l}\right)\right)^2 + \left(\sum_{q \in Q} \cos\left(\frac{2\pi z}{l}\right)\right)^2} \quad (1.1)$$

Donde  $z$  es la componente de cada acorde y  $l$  los ciclos que se van a evaluar

A continuación desarrollaré la aplicación práctica de la ecuación con el conjunto  $[0, 2, 6]$ . Se evalúa el primer componente del acorde (0) con cada uno de los componentes de la serie armónica, en este caso evaluaremos 6 divisiones de la octava en el sistema temperado de 12 notas, por lo tanto los componentes serán  $[12, 6, 4, 3, 2.4, 2]$ .

$$|\mathcal{F}_q(z)| = \sqrt{\left(\sin\left(\frac{2\pi(0)}{12}\right) + \sin\left(\frac{2\pi(2)}{12}\right) + \sin\left(\frac{2\pi(6)}{12}\right)\right)^2 + \dots}$$

$$\sqrt{\dots + \left(\cos\left(\frac{2\pi(0)}{12}\right) + \cos\left(\frac{2\pi(2)}{12}\right) + \cos\left(\frac{2\pi(6)}{12}\right)\right)^2}$$

$$|\mathcal{F}_q(z)| = 1$$

Para el segundo componente

$$|\mathcal{F}_q(z)| = \sqrt{\left(\sin\left(\frac{2\pi(0)}{6}\right) + \sin\left(\frac{2\pi(2)}{6}\right) + \sin\left(\frac{2\pi(6)}{6}\right)\right)^2 + \dots}$$

<sup>1</sup>La transformada de fourier es una técnica matemática que se usa para descubrir periodicidades en una amplia gama de fenómenos, Lewin (1959) fue el primero en encontrar una relación entre la transformada de Fourier y el contenido armónico de un acorde. Quinn hace uso de la transformada de fourier como medio para comparar acordes con varios ciclos de intervalo, lo que nos proporciona un modelo armónico por el cual podemos caracterizar un acorde y compararlos con otro (Callender, 2007; Quinn, 2006).

<sup>11</sup>Se hace uso del teorema de pitagoras con el fin de condensar o unir los dos valores de las componentes de seno y coseno en una sola magnitud.

$$\sqrt{\dots + \left( \cos\left(\frac{2\pi(0)}{6}\right) + \cos\left(\frac{2\pi(2)}{6}\right) + \cos\left(\frac{2\pi(6)}{6}\right) \right)^2}$$

$$|\mathcal{F}_q(z)| = \sqrt{3}$$

Para el tercer componente

$$|\mathcal{F}_q(z)| = \sqrt{\left( \sin\left(\frac{2\pi(0)}{4}\right) + \sin\left(\frac{2\pi(2)}{4}\right) + \sin\left(\frac{2\pi(6)}{4}\right) \right)^2 + \dots}$$

$$\sqrt{\dots + \left( \cos\left(\frac{2\pi(0)}{4}\right) + \cos\left(\frac{2\pi(2)}{4}\right) + \cos\left(\frac{2\pi(6)}{4}\right) \right)^2}$$

$$|\mathcal{F}_q(z)| = 1$$

Y así, sucesivamente con los componentes restantes, lo cual nos arroja el siguiente vector:

$$|\mathcal{F}_{(0,2,6)}| = [1, \sqrt{3}, 1, \sqrt{3}, 1, 3]$$

Este vector representa el spectra del acorde [C,D,F#], es decir; la correlación que existe entre cada una de las alturas con cada uno de los ciclos o parciales de los componentes de la serie armónica.

### 1.3.2. Métrica euclidiana en $\mathbb{R}^6$

La distancia euclídea es la distancia ordinaria entre dos puntos de un espacio euclídeo, la cual está definida a partir del teorema de Pitágoras. Para un espacio euclídeo de n-dimensiones, la distancia euclidiana se define mediante la siguiente ecuación:

Ecuación distancia euclídea extraída de Callender (2007)

$$d(P, Q) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - q_i)^2} \quad (1.2)$$

Se calculará la distancia euclídea entre los conjuntos [4, 6, 7, 11] y [7, 9, 11].

Por lo tanto, sus respectivos Spectra son:

$$P=[1.56, 1.73, 2.0, 1.00, 2.39, 0.00]^I$$

$$Q=[2.00, 0.00, 1.00, 0.00, 1.99, 3.00]$$

Aplicando la ecuación 2.2

$$d(P, Q) = \sqrt{(1,56 - 2,00)^2 + (1,73 - 0,00)^2 + (1,00 - 0,00)^2 + (1,99 - 3)^2}$$

$$d(P, Q) \approx 3,79$$

### 1.3.3. Distancia angular en $\mathbb{R}^6$

La distancia angular esta definida por la siguiente ecuación:

$$\cos \theta = \frac{P \cdot Q}{\|P\| \|Q\|} \quad (0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2})^{II} \quad (1.3)$$

A continuación un ejemplo para ilustrar el procedimiento con los conjuntos [2,4,6,7] y [6,7,9,11,2]

Sus respectivos Spectra son:

$$P = [2.24, 1.00, 1.42, 1.00, 2.24, 2.00]$$

$$Q = [1.24, 0.99, 2.24, 0.99, 2.91, 1.00]$$

Entonces

$$P^2 = (5,02, 1, 2,01, 1,00, 5,02, 4,00)$$

$$Q^2 = (1,53, 0,98, 5,02, 0,98, 8,47, 1,00)$$

$$P^2 \cdot Q^2 = 7,68 + 0,98 + 10,09 + 0,98 + 42,52 + 4 \approx 65,91$$

$$\|P^2\| = 8,50$$

$$\|Q^2\| = 10,09$$

Por lo tanto

$$\angle(P^2, Q^2) = \arccos \frac{65,91}{(8,50)(10,09)} = 39,92^\circ$$

<sup>I</sup>Hay valores que son tan pequeños que tienden a 0, por lo tanto son puestos como 0. Las cifras fueron aproximadas a dos decimales

<sup>II</sup>En álgebra lineal, el ángulo está dado para valores entre  $0 \leq \theta \leq \pi$  (Williams, 2012). Pero para

## 1.4. Teoría de grafos

La teoría de grafos es una disciplina de las matemáticas discretas y aplicadas que hace uso de conceptos de áreas tales como la aritmética, el álgebra, combinatoria, la probabilidad, la geometría y la topología, con el fin de analizar y estudiar relaciones existentes entre los grafos. Los grafos son una herramienta que permite modelar fenómenos discretos para analizar problemas concretos de la vida real, son aplicados usualmente en problemas de física, química, ciencias de la computación, genética, tecnología informática, psicología, sociología y lingüística (Balakrishnan y Ranganathan, 2012).

### 1.4.1. Aplicaciones en música

La teoría de grafos junto con la teoría de conjuntos se emplea como un enfoque que facilita la búsqueda de patrones en el análisis musical <sup>1</sup>. La pieza es modelada como un gráfico, cada nota, acorde o elemento musical es representado como un vértice y la relación entre un par de estos elementos son representados con aristas. A continuación se ejemplificaran algunos de sus usos:

#### 1.4.1.1. Relaciones armónicas

La teoría de grafos se puede usar para analizar y observar las relaciones armónicas presentes en una obra, siendo posible su articulación con la teoría de conjuntos. Como modelo de aplicación se analizaron las relaciones armónicas existentes en el pasillo *El Tambo (Satanás)* del compositor bogotano Emilio Murillo

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
Em	B <sup>7</sup>	Bm <sup>7(b5)</sup>	E <sup>7</sup>	Am	F <sup>♯</sup> m <sup>7(b5)</sup>	D <sup>6</sup>	C <sup>7</sup>	Am <sup>7</sup>	D <sup>7</sup>
<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>
G	Em <sup>7</sup>	G <sup>Δ</sup> 7	G <sup>6</sup>	G <sup>7</sup>	C	Em <sup>7(b5)</sup>	A <sup>7</sup>	Dm <sup>7</sup>	Dm <sup>6</sup>

**Tabla 1.1:** Universo armónico de *El Tambo*

Posteriormente se establece la relación entre estos acordes en una matriz de adyacencia su uso en música, la diferencia angular (ANGLE) mide la independencia, no la oposición del sonido. Es perfectamente apropiado que su valor máximo sea 90 (es decir  $\frac{\pi}{2}$ ), representando perpendicularidad, en lugar de 180, representando una dirección negativa (Scott y Isaacson, 1998).

<sup>1</sup>Puede encontrar ejemplos de teoría de conjuntos aplicado al análisis en Marvin y Laprade (1987), Morris (1993), Straus (2016), Rahn (1987).

cia<sup>1</sup>, en donde los números del 1 al 20 representan los nodos del grafo (los acordes de la canción), por cada arista que une a dos nodos, se asigna un uno (1) de lo contrario se deja en cero (0) la casilla, es decir si existe o no paso de un acorde a otro en la canción, por ejemplo, del acorde 1 (Em) puede pasar a los acordes 1 (Em), 2 (B<sup>7</sup>), 3 (Bm<sup>7(b5)</sup>), 6 (F#m<sup>7(b5)</sup>), 7 (D<sup>6</sup>) y 15 (C). A continuación se ilustran todas las posibles conexiones entre acordes de la canción el tambo.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1 Em	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
2 B <sup>7</sup>	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3 Bm <sup>7(b5)</sup>	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4 E <sup>7</sup>	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5 Am	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6 F#m <sup>7(b5)</sup>	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7 D <sup>6</sup>	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8 C <sup>7</sup>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9 Am <sup>7</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10 D <sup>7</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
11 G	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
12 Em <sup>7</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
13 G <sup>δ7</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
14 G <sup>6</sup>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15 G <sup>7</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0
16 C	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
17 Em <sup>7(b5)</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
18 A <sup>7</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
19 Dm <sup>7</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
20 Dm <sup>6</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0

**Tabla 1.2:** Matriz de adyacencia de la canción el tambo

También, podemos asignarle un peso a las aristas, y es aquí donde integramos teoría de conjuntos con la teoría de grafos, en primer lugar calculamos el espectra de cada acorde, enseguida calculamos la distancia angular entre los acordes que guardan alguna relación. En la tabla 1.3 se ilustra el espectra de los acordes de *El tambo* y en la tabla 1.4 se ilustra su distancia angular.

<sup>1</sup>Una matriz de adyacencia es una matriz cuadrada que se usa para representar relaciones binarias (Biggs, 1993; Wilson, 1970)

# 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL SISTEMA SIMBIOSIS

1	1.0	1.7320508075688774	1.0	1.732050807568877	0.9999999999999993	3.0
2	0.5176380902050419	1.0000000000000007	1.4142135623730963	2.6457513111064589	1.9318516525781357	2.0
3	0.5176380902050417	1.0	1.414213562373097	2.645751311106459	1.9318516525781344	2.0
4	0.5176380902050411	1.0000000000000004	1.4142135623730936	2.6457513111064591	1.9318516525781364	2.0
6	0.5176380902050415	0.9999999999999994	1.414213562373095	2.6457513111064591	1.9318516525781357	2.0
7	0.7320508075688774	7.447602459741819e-15	2.0000000000000002	1.999999999999997	2.7320508075688754	5.022289837777324e-15
8	0.5176380902050411	1.0000000000000002	1.4142135623730945	2.6457513111064591	1.9318516525781355	2.0
9	0.7320508075688771	3.510833468576701e-16	2.0	2.0000000000000013	2.732050807568878	1.4695761589768238e-15
10	0.5176380902050414	1.0000000000000002	1.4142135623730951	2.64575131110645903	1.9318516525781362	2.0
11	0.5176380902050413	0.9999999999999993	2.2360679774997907	1.7320508075688776	1.931851652578135	1.0
12	0.7320508075688772	7.10889595793346e-16	1.9999999999999998	2.0000000000000004	2.732050807568876	5.022289837777325e-15
13	0.5176380902050419	1.7320508075688767	2.828427124746191	0.9999999999999993	1.9318516525781348	4.777360477947855e-15
14	0.7320508075688771	7.10889595793346e-16	2.0	2.0000000000000004	2.732050807568876	5.022289837777325e-15
15	0.5176380902050416	1.0	1.414213562373096	2.64575131110645903	1.9318516525781344	2.0
16	0.5176380902050417	1.0	2.2360679774997894	1.7320508075688785	1.9318516525781368	1.0
17	0.5176380902050416	0.9999999999999996	1.414213562373095	2.64575131110645907	1.9318516525781353	2.0
18	0.5176380902050416	1.0000000000000002	1.4142135623730951	2.64575131110645907	1.9318516525781366	2.0
19	0.8965754721680532	1.7320508075688776	1.5700924586837752e-16	1.0000000000000004	3.3460652149512327	1.7145055188062944e-15
20	1.239313674927476	0.9999999999999999	1.4142135623730967	0.9999999999999996	2.9093129111764084	2.0

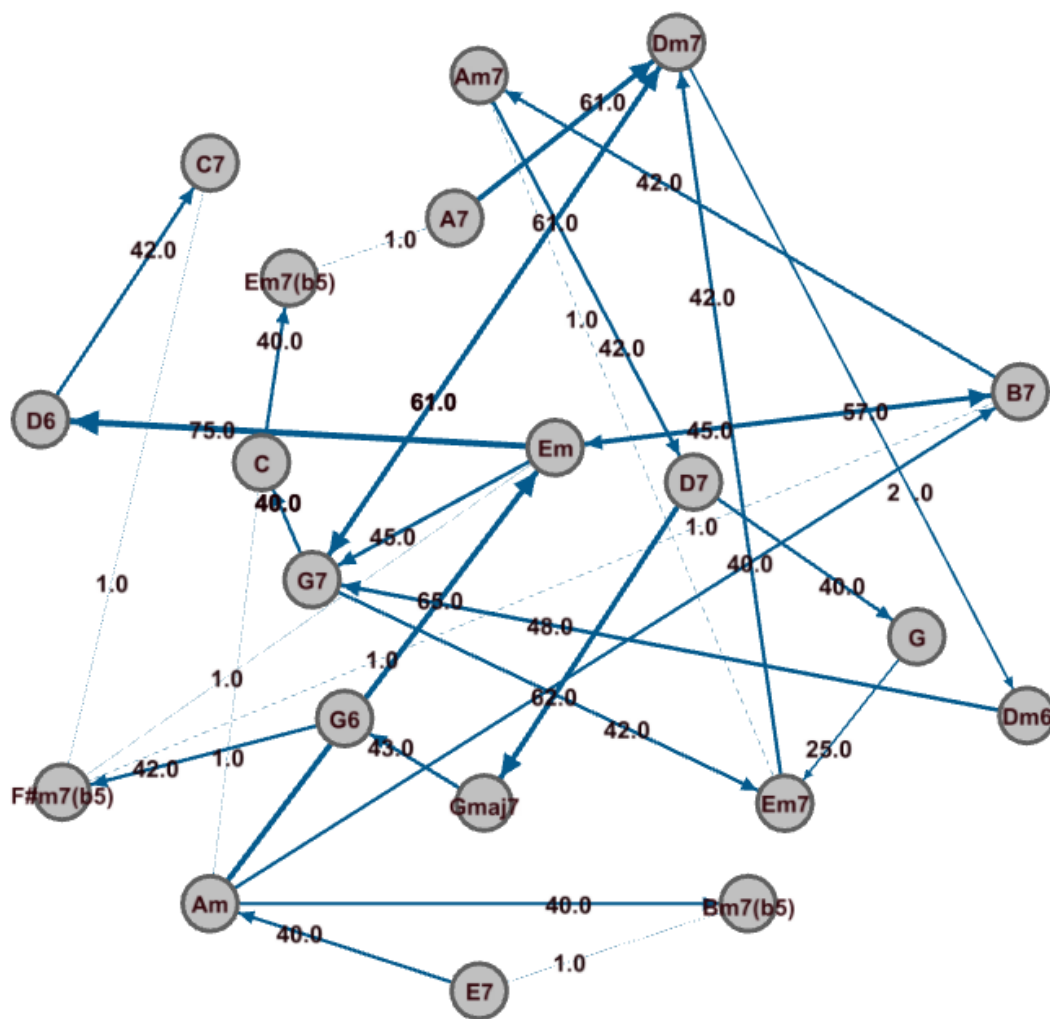
Tabla 1.3: Elaboración propia.

1	[44.52]	[44.52]	[44.52]	[75.33]	[44.52]	[44.52]	[44.52]	[78.24]	[56.93]
2	[44.52]	[0.0]	[0.0]	[41.89]	[0.0]	[39.51]	[0.0]	[60.89]	[48.08]
3	[44.52]	[0.0]	[0.0]	[41.89]	[0.0]	[39.51]	[0.0]	[60.89]	[48.08]
4	[44.52]	[0.0]	[0.0]	[41.89]	[0.0]	[39.51]	[0.0]	[60.89]	[48.08]
5	[65.16]	[39.51]	[39.51]	[25.24]	[39.51]	[0.0]	[39.51]	[54.4]	[43.81]
6	[44.52]	[0.0]	[0.0]	[41.89]	[0.0]	[39.51]	[0.0]	[60.89]	[48.08]
7	[75.33]	[41.89]	[41.89]	[25.24]	[41.89]	[0.0]	[41.89]	[34.22]	[34.22]
8	[44.52]	[0.0]	[0.0]	[41.89]	[0.0]	[39.51]	[0.0]	[60.89]	[48.08]
9	[75.33]	[41.89]	[41.89]	[25.24]	[41.89]	[0.0]	[41.89]	[34.22]	[34.22]
10	[44.52]	[0.0]	[0.0]	[41.89]	[0.0]	[39.51]	[0.0]	[60.89]	[48.08]
11	[65.16]	[39.51]	[39.51]	[25.24]	[39.51]	[0.0]	[39.51]	[54.4]	[43.81]
12	[75.33]	[41.89]	[41.89]	[25.24]	[41.89]	[0.0]	[41.89]	[34.22]	[34.22]
13	[75.33]	[62.27]	[62.27]	[43.34]	[62.27]	[43.34]	[62.27]	[61.62]	[55.55]
14	[75.33]	[41.89]	[41.89]	[25.24]	[41.89]	[0.0]	[41.89]	[34.22]	[34.22]
15	[44.52]	[0.0]	[0.0]	[41.89]	[0.0]	[39.51]	[0.0]	[60.89]	[48.08]
16	[65.16]	[39.51]	[39.51]	[25.24]	[39.51]	[0.0]	[39.51]	[54.4]	[43.81]
17	[44.52]	[0.0]	[0.0]	[41.89]	[0.0]	[39.51]	[0.0]	[60.89]	[48.08]
18	[44.52]	[0.0]	[0.0]	[41.89]	[0.0]	[39.51]	[0.0]	[60.89]	[48.08]
19	[78.24]	[60.89]	[60.89]	[54.4]	[60.89]	[54.4]	[60.89]	[0.0]	[28.93]
20	[56.93]	[48.08]	[48.08]	[34.22]	[48.08]	[43.81]	[48.08]	[28.93]	[0.0]

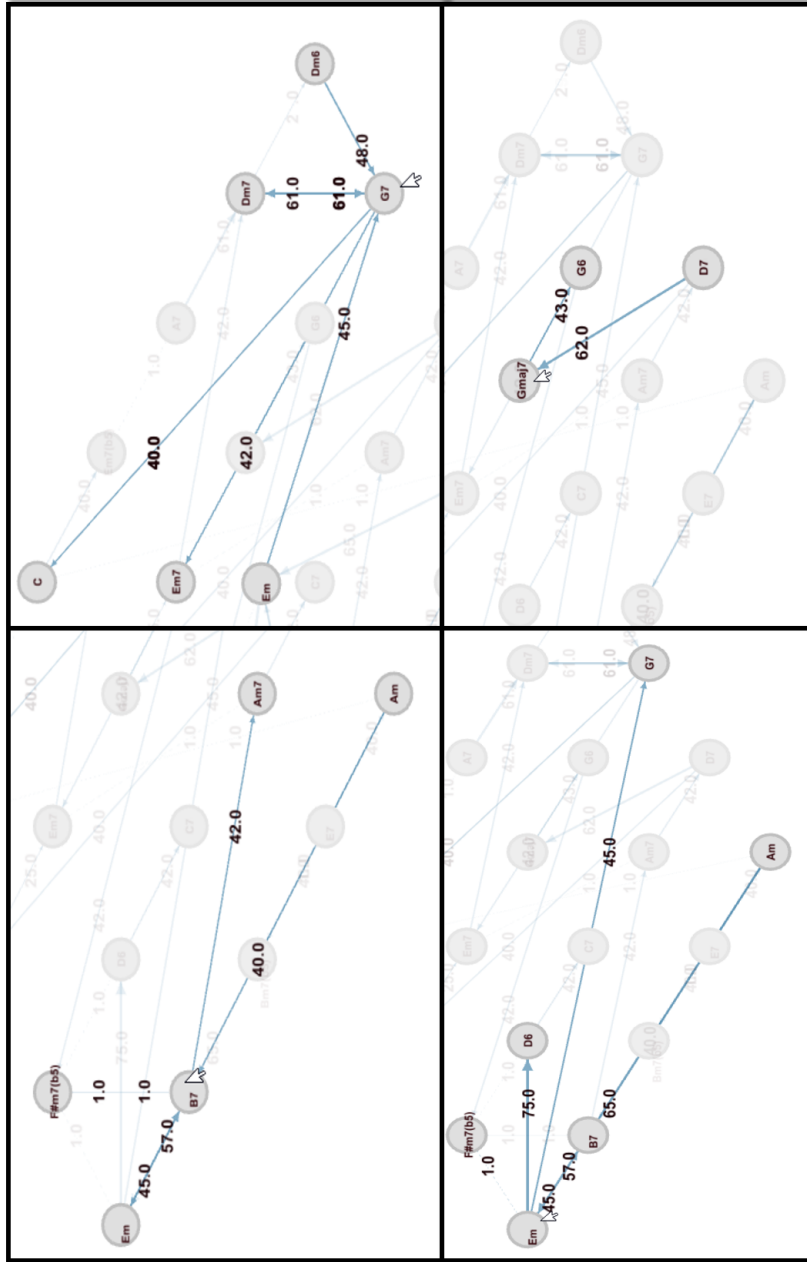
Tabla 1.4: Elaboración propia.



Finalmente, por medio de un software de análisis y representación de redes de datos, se cargan estas tablas para visualizar el grafo. En la figura 1.10 se ilustra el grafo del universo armónico de *El Tambo*. Si seleccionamos alguno de los nodos se podrán observar las relaciones presentes en determinado acorde, cuáles acordes llegan a él o a cuáles puede dirigirse lo anterior es ilustrado en la figura 1.11.



**Figura 1.10:** Grafo del universo armónico *El Tambo* en donde cada nodo representa un acorde, las líneas representan la posibilidad de paso de un acorde a otro y su grosor representa distancia angular, la cual está acompañada de un número y también está asociada al grosor de la línea, siendo más gruesa si la distancia angular es mayor. Existen enlaces unidireccionales como el paso del Em al D<sup>6</sup> y enlaces bidireccionales, estos enlaces son extraídos de la matriz de adyacencia de la canción la cual no es mas que un análisis de la canción en la cual se detalla la conexión entre los acordes presentes como el existente entre el Em y el B<sup>7</sup>. Elaboración propia en el software Gephi.



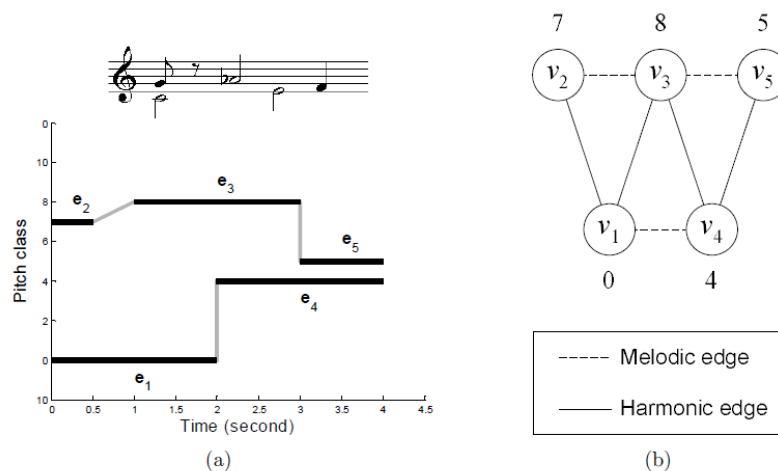
**Figura 1.11:** Diferentes relaciones armónicas de *El Tambo*. En el cuadro (A) se expone las relaciones armónicas del acorde B7 el cual puede dirigirse a un Am7, Am, Em y F#m7, el enlace entre el B7 y el F#m(b5) indica una distancia angular casi nula y los demás enlaces están entre los 40° y 57°. Este cuadro también nos indica que en la canción existen las siguientes posibilidades: el paso entre un B7 a un Em y viceversa, de igual forma entre el B7 y el F#m(b5), el paso de B7 a un Am7 pero no en dirección contraria, el paso de un Am a un B7 pero no en dirección contraria. Los cuadros (B), (C) y (D) ilustran lo mismo pero partiendo desde un G7, un Em y un Gmaj7 respectivamente. Elaboración propia.

### 1.4.1.2. Relaciones melódicas

Las relaciones melódicas pueden describirse mediante el modelo de *segregación de flujo*<sup>1</sup>. Un flujo es la impresión perceptual de conectar una serie de notas musicales y segregación del flujo es el proceso de agrupar notas musicales en flujos (Szeto y Wong, 2006). Bregman divide la segregación de flujos en dos procesos: la integración simultánea y la integración secuencial. La integración simultánea es el proceso de agrupar las frecuencias en notas musicales. La integración secuencial es el proceso de agrupar las notas musicales en flujos (A. S. Bregman, 1994).

En un modelo de *segregación de flujo*, cada nota musical se representa como un evento. Un evento  $e$  es un vector compuesto por la terna  $t^s, t^e, p$  donde  $t^s$  es el tiempo inicial,  $t^e$  el tiempo final y  $p$  es la altura, existiendo dos tipos de relación entre dos eventos: *eventos secuenciales* y *eventos simultáneos* (Szeto y Wong, 2006),

Lo anterior se puede ilustrar por medio del siguiente ejemplo. En la figura 1.12, los eventos pares  $[e_1, e_4]$ ,  $[e_1, e_5]$ ,  $[e_2, e_3]$ ,  $[e_2, e_4]$ ,  $[e_2, e_5]$  y  $[e_3, e_5]$  son eventos secuenciales puesto que no se superponen en un mismo tiempo. Y, los eventos pares  $[e_1, e_2]$ ,  $[e_1, e_3]$ ,  $[e_3, e_4]$  y  $[e_4, e_5]$  son eventos simultáneos.



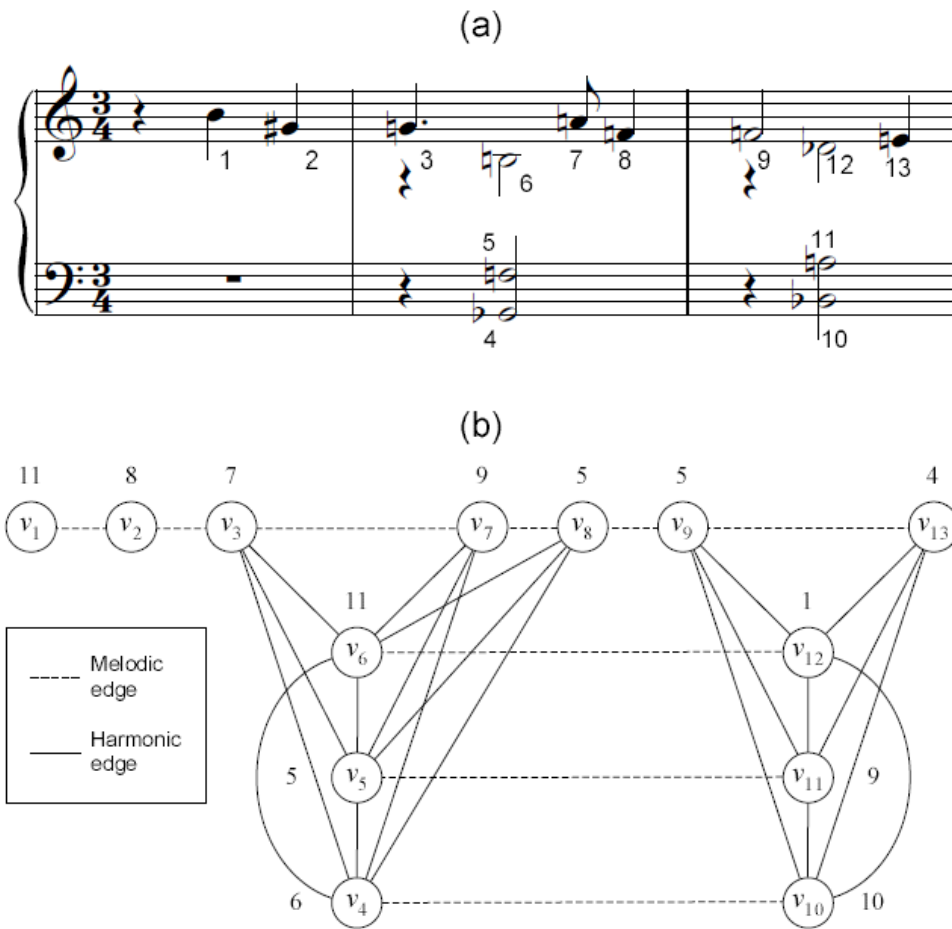
**Figura 1.12:** Ejemplo de 5 eventos. (a) Los flujos son identificados como un algoritmo de segregación de flujos:  $e_1, e_4$  es un flujo y  $e_2, e_3, e_5$  son otro flujo. (b) Grafo correspondiente, donde el Vertice  $v_i$  corresponde al evento  $e_i$ , el número que acompaña el vértice corresponde a su altura. Extraído de Szeto y Wong (2006)

<sup>1</sup>*Stream Segregation Model* es un objeto de estudio del análisis de la escena auditiva (ASA: *Auditory Scene Analysis*) el cual es una disciplina que se ha ocupado tradicionalmente de cómo el sistema auditivo organiza perceptualmente sonidos procedentes de diferentes fuentes, ya sean sonidos discretos (por ejemplo, timbre del teléfono, por arma de fuego) o secuencias de sonidos (por ejemplo, la melodía, la voz de alguien en algún lugar) (A. Bregman, 1990; Snyder y cols., 2012)

## 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL SISTEMA *SIMBIOSIS*

---

En la figura 1.13 se ilustra la aplicación práctica de esta teoría en el análisis musical de algunos compases de la obra *Klavierstücke*, Op. 11 N°1 de Schoenberg.



**Figura 1.13:** (a) Partitura de Schoenberg's *Klavierstücke*, Op. 11 N°. 1, compases 1-3. El número que acompaña la nota corresponde al vértice. (b) Grafo correspondiente al fragmento musical. Este grafo fue generado a partir del modelo de segregación de flujo. Extraído de Szeto y Wong (2006)

Aunque en el presente proyecto no se haya estructurado, programado y aplicado de forma directa la segregación de flujo en las relaciones melódicas, como sí se hizo en las relaciones armónicas, se pretende que esta segregación de flujo sea percibida por el oyente resultado del devenir y la interacción entre las entidades sónicas.

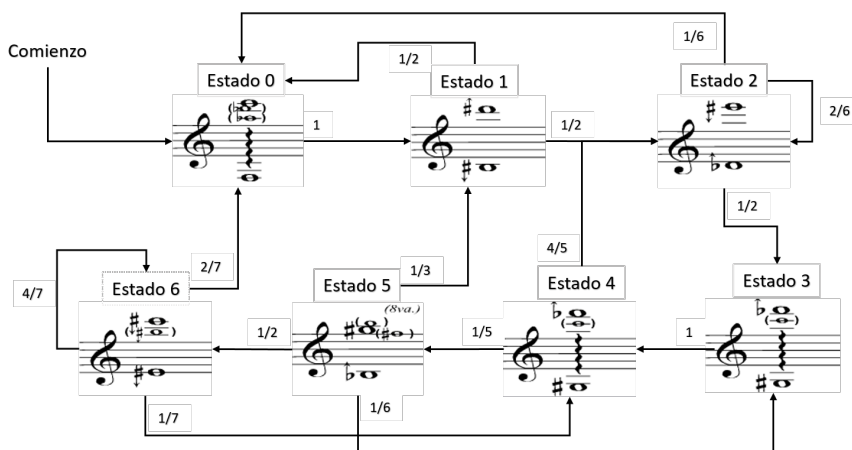
## 1.5. Teoría de la probabilidad

*El lenguaje de la estadística es una manera subjetiva de analizar la objetividad de la naturaleza. Recurrimos a ella no porque los acontecimientos sean de naturaleza azarosa, sino porque desconocemos subjetivamente cuál va a ser el curso que van a tomar dichos acontecimientos. (Schifter, 2000)*

Isaac Schifter, La ciencia del Caos.

Puesto que este proyecto hace uso de procesos estocásticos<sup>I</sup> II y aleatorios, es importante definir el concepto *Cadena de Márkov* propio de la teoría de la probabilidad, el cual es fundamental para la programación de autómatas y vida artificial. El modelo de Márkov fue introducido por el matemático ruso Andrey Andreyevich Márkov (1856-1992)(Basharin y cols., s.f.) y describe un proceso estocástico discreto; una secuencia de variables o eventos aleatorios correspondientes a un sistema en cual la probabilidad de que ocurra un evento depende del evento anterior (Ching y Ng, 2006).

La figura 1.14 ilustra un ejemplo de cadena de Márkov a partir de multifónicos en el clarinete como estados y la tabla 1.5 detalla su respectiva matriz de transición.<sup>III</sup>



**Figura 1.14:** Cadena de Márkov de multifónicos en el clarinete. Elaboración propia

<sup>I</sup>Que tiene una distribución de probabilidad aleatoria o patrón que pueden ser analizados estadísticamente, pero no pueden predecirse con precisión (*Oxford Living Dictionaries*, 2016).

<sup>II</sup>Xenakis fue uno de los precursores del uso de procesos estocásticos en música, entre sus obras esta *Pithoprakta* que hace uso de mecanismos estadísticos de los gases, *Diamorphoses* obra que hace uso de distribución estadística de puntos en un plano (Solomos, 2011), *Achorripsis* hace uso de restricciones mínimas (Childs, 2002), *Analogiques* la cual hace uso de cadenas de Márkov. *Duel Y Stratégie* que hace uso de teoría de juegos, *Nomos Alfa* con teoría de grupos (Vriend, 1981), las obras *Herma* y *Fonta* utiliza teoría de conjuntos (Chrissochoidis y cols., 2005) y *N'Shima* hace uso de movimiento browniano (Xenakis, 1992)

<sup>III</sup>Posiciones extraídas de del Grazia (2016)

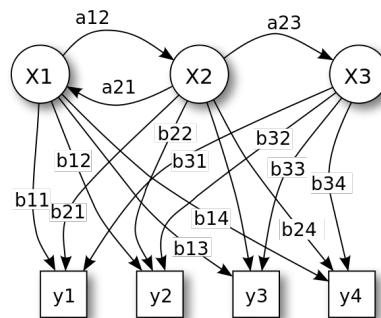
## 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL SISTEMA *SIMBIOSIS*

	Estado 0	Estado 1	Estado 2	Estado 3	Estado 4	Estado 5	Estado 6
Estado 0	0,00 %	100 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
Estado 1	50 %	50 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
Estado 2	16,67 %	0,00 %	33,33 %	50,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
Estado 3	100 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
Estado 4	80,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	20,00 %	0,00 %
Estado 5	33,33 %	0,00 %	0,00 %	16,67 %	0,00 %	0,00 %	50,00 %
Estado 6	28,57 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	14,29 %	0,00 %	57,14 %

**Tabla 1.5:** Matriz de transición de la cadena de Márkov de multifónicos en el clarinete

### 1.5.1. Cadenas de Márkov ocultas

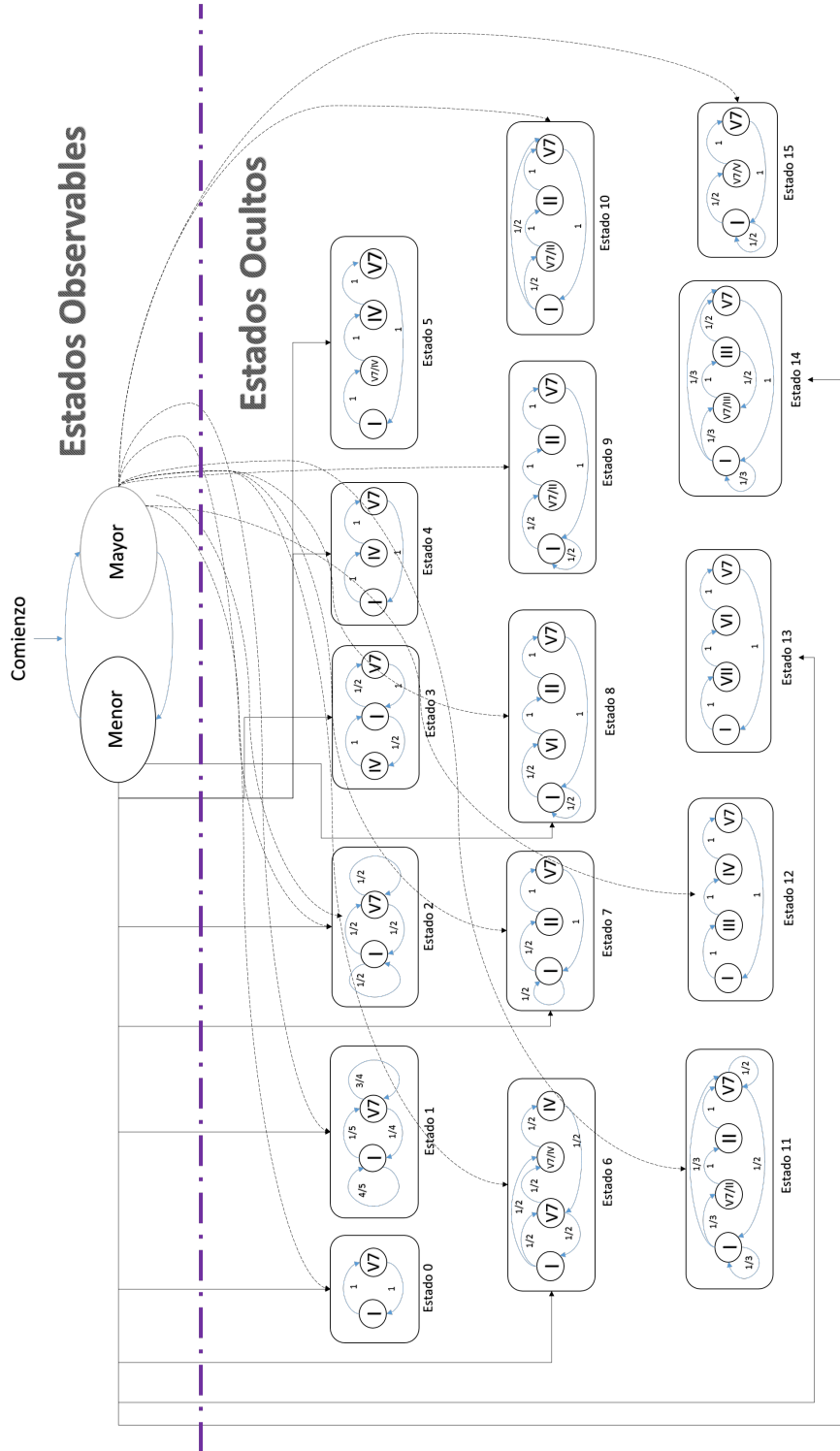
Las cadenas de Márkov Ocultas (CMOs)<sup>I</sup> (Rabiner, 1989) son notablemente usadas en el reconocimiento del habla (Bourlard y Morgan, 2012), la bioinformática (Koski, 2001), la clasificación de géneros musicales (Karpov y Subramanian, 2002) (Chai y Vercoe, 2001), armonización de corales (Allan y Williams, 2005), acompañamiento armónico (Simon y cols., 2008) y muchas otras más. En un modelo oculto de Márkov, los estados no son visibles directamente, sólo son observables las variables influidas por el estado. Cada estado tiene una distribución probabilística en posibles símbolos de salida y de esta manera la secuencia de símbolos generada por una CMO suministra información sobre la secuencia de estados. Es decir, en un CMO existen dos estados: los estados observables y los estados ocultos (Ching y Ng, 2006), (Schwardt y du Preez, 2000), (Van Der Merwe y Schulze, 2011)(Nierhaus, 2009).<sup>II</sup>



**Figura 1.15:** Parámetros probabilísticos de una cadena oculta de Márkov donde, “X” son los estados, “y” son las posibles observaciones, “a” la probabilidad de transición de un estado y “b” las probabilidades de salida.

<sup>I</sup>En inglés HMMS (*Hidden Márkov Models*)

<sup>II</sup>Si desea consultar la definición formal de un modelo oculto de Márkov puede dirigirse a Schulze (2009) o Barbu y Limnios (2009)



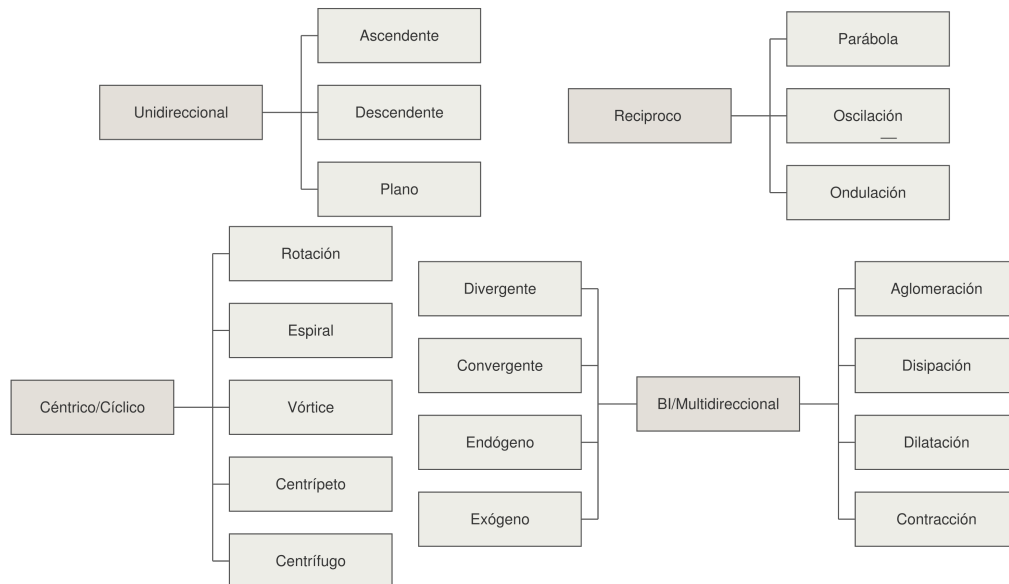
**Figura 1.16:** Ejemplo de cadena de Márkov oculta con base en los elementos básicos del sistema ritmo-armónico de las músicas andinas occidentales: Los estados observables se vinculan a la escala mayor y menor, los estados ocultos son las distintas progresiones características de las músicas andinas occidentales. Y, Los números que acompañan cada flecha determinan la probabilidad de un nodo pase a otro, siendo 1 el 100%, 1/2 el 50%, 1/3 el 0.33%, etc. Progresiones armónicas extraídas de Franco (2005)

## 1.6. Espectro / tipo - morfología

La teoría espectro / tipo morfológica<sup>1</sup> desarrollada por Schaeffer (1988) (Thoresen y Hedman, 2007)(Eiriz, 2012) y posteriormente Smalley (1997) no solo se establece como una metodología analítica sino que también se constituye como herramienta compositiva y teórica. Estos dos autores desarrollaron distintas clasificaciones de los sonidos con base en criterios topológicos y morfológicos, este enfoque provee un marco de referencia para comprender relaciones estructurales y comportamientos sonoros experimentados en el flujo temporal de la música (Cádiz, 2008). A continuación se describirá una de estas clasificaciones usadas en el presente proyecto.

### 1.6.1. Tipología del movimiento

Smalley (1986) realizó una clasificación de los diferentes tipos de movimiento, los cuales pueden ser una amalgamación compleja de varios tipos y tendencias, ambigüedades y contracciones, existiendo 5 categorías representativas: uni-direccional, bi-direccional, recíproco, céntrico/cíclico y excéntrico/multi-direccional. A continuación describiré cada uno de los conceptos del gráfico.



**Figura 1.17:** Tipología de movimiento. Imagen tomada de Zattra (2005) la cual es una abstracción de Smalley (1986). Traducción propia.

---

<sup>1</sup>Espectro de sonido y morfología se refiere a la evolución de su molde o forma de onda a través del tiempo.



#### 1.6.1.1. Unidireccional y bidireccional

- **Plano:** liso, llano, raso, uniforme, homogéneo, constante, sostenido, sin fluctuación.
- **Ascendente y descendente:** material organizado de menor a mayor que aumenta, ó material organizado de mayor a menor que disminuye.
- **Divergente y convergente:** se aplica a la línea que se aparta de otra. Que tiende a no coincidir con las ideas o tendencias sociales. La convergencia es lo contrario.

#### 1.6.1.2. Recíproco

- **Parábola:** una parábola es una curva en la que los puntos están a la misma distancia de: un punto fijo (el foco), y una línea fija (la directriz).
- **Oscilación:** se denomina oscilación a una variación, perturbación o fluctuación en el tiempo de un medio o sistema.
- **Ondulación:** relieve de un terreno en el que se suceden elevaciones y depresiones.

#### 1.6.1.3. Céntrico / cíclico

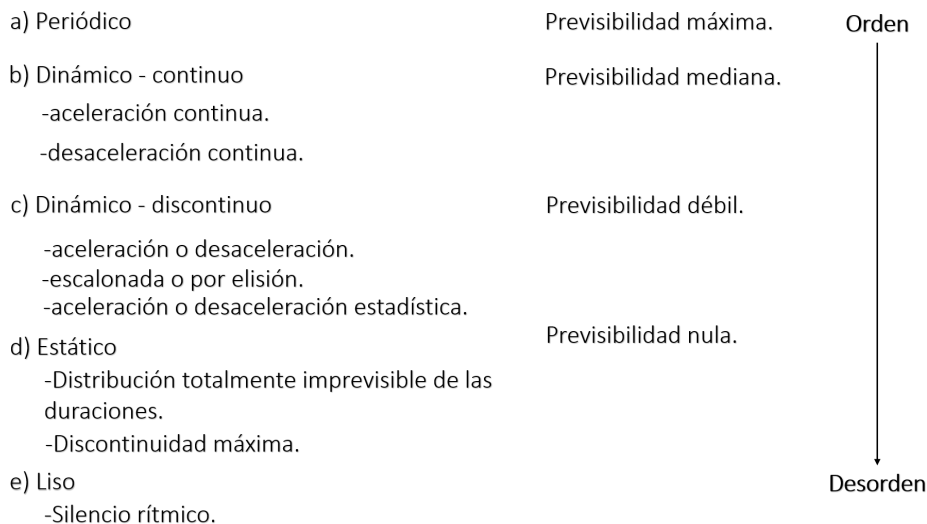
- **Centrífugo y centrípeto:** centrífugo hace referencia a algo que se aleja del centro, por el contrario el concepto centrípeto hace referencia a algo que atrae, dirige o impele hacia el centro.
- **Vórtex:** el concepto nombra a un flujo que rota en sentido de espiral, como un remolino o un torbellino.
- **Hélix:** en geometría, es el nombre que recibe toda línea curva cuyas tangentes forman un ángulo constante, siguiendo una dirección fija en el espacio.

#### 1.6.1.4. Excéntrico / multidireccional

- **Acumulación y disipación:** Acumular hace referencia a la reunión y amontonamiento progresivo de un gran número de cosas. Por otro lado, disipación representa desaparecer, reducir gradualmente la intensidad de algo.
- **Exógeno y Endógeno:** que se forma o nace en el exterior de otro. Que se debe a causas externas. Lo anterior es contrario a endógeno lo cual se origina o nace en el interior, como la célula que se forma dentro de otra. Que se origina por una causa interna.
- **Difracción:** se habla de difracción cuando el sonido se dispersa como consecuencia del encuentro con obstáculos que no le son transparentes.

## 1.7. Esqueleto del tiempo

Grisey (1987) define el concepto *esqueleto del tiempo* como el recorte temporal que realiza el compositor, con el fin de atribuirle una forma a los sonidos. Adicionalmente, Stockhausen (2006) establece que poseemos una concepción de las relaciones temporales gracias a los cambios en el campo acústico, es decir silencio-sonido-silencio, o sonido-silencio-sonido. Es por esto que muchos teóricos han realizado caracterizaciones del ritmo y las duraciones, casi siempre dualistas: largo-breve, binario-ternario, simétrico-asimétrico... etc, sin embargo, Grisey, a partir de la teoría de la información establece una clasificación del fenómeno temporal.

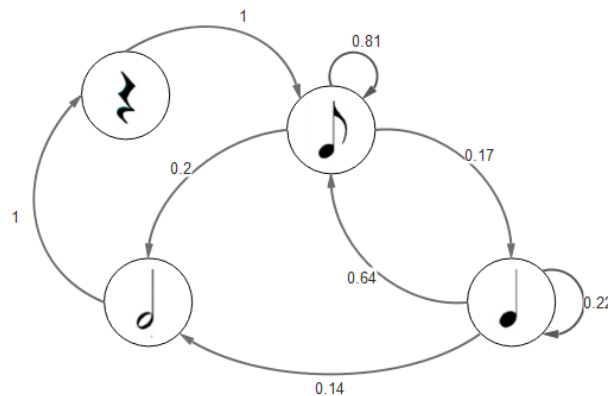


**Figura 1.18:** Esqueleto del tiempo. Imagen tomada de Grisey (1987)

La figura 1.18 nos indica que los eventos temporales periódicos tienen una previsibilidad máxima, esto se refiere a que los eventos temporales que son repetitivos son más susceptibles a ser predecibles, diferente a eventos que tienden a ser aleatorios, los cuales son poco predecibles. Esto puede ser modelado y más fácil de comprender por medio de una cadena de Márkov. En la tabla 1.6 se muestra la matriz de transición de la canción *Julia, Julia, Julia* del compositor Jorge Velosa, en donde se presenta 4 estados (corchea, negra, blanca y silencio de negra). Asimismo la figura 1.20 representa su respectivo grafo. Se evidencia que existe alta periodicidad en el estado de la corchea, y el paso de silencio de negra a corchea y de blanca a silencio de negra es del 100%. Si la matriz de transición tuviese otras distribuciones porcentuales guardando otras proporciones o siendo más aleatorias, la previsibilidad sería inferior.

	Corchea	Negra	Blanca	Silencio Negra
Corchea	80,95	16,67	2,38	0
Negra	64,29	21,43	14,29	0
Blanca	0	0	0	100
Silencio Negra	100	0	0	0

**Tabla 1.6:** Matriz de transición de la canción *Julia, Julia, Julia* del compositor Jorge Velosa



**Figura 1.19:** Cadena de Márkov de la canción *Julia, Julia, Julia*. Elaboración propia en Edraw-Max.

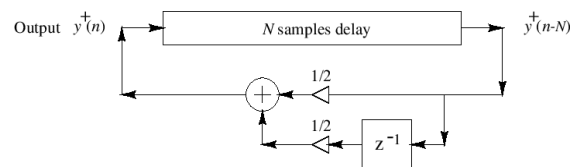
## 1.8. Síntesis por Modelado Físico

Este tipo de síntesis consiste en producir sonidos a partir de un modelo físico-matemático de los elementos que interactúan dentro del instrumento real, es decir, este modelo se compone de las leyes de la física que rigen la producción del sonido, teniendo en cuenta parámetros tales como los materiales físicos y dimensiones del instrumento. Se obtiene un modelo físico-matemático de los elementos principales del instrumento (excitador, resonador y radiador) y de su interacción mutua, las cuales son descritas por medio de ecuaciones diferenciales y otros elementos matemáticos. Una vez es conseguido el modelo físico, se diseña un algoritmo de resolución por métodos numéricos,<sup>1</sup> el cual produce el sonido (Kojis y cols., 2007; Nackaerts, 2003; Rabenstein y Trautmann, 2001; Smith, 2010; Trautmann y Rabenstein, 2012).

<sup>1</sup>Los métodos numéricos corresponde a la ramas de las matemática encargada de diseñar algoritmos basados en reglas matemáticas con el fin de simular procesos del mundo real (Hildebrand, 1987).

### 1.8.1. Algoritmo Karplus-Strong

El algoritmo *Karplus-Strong* (KP) es un tipo de síntesis por modelado físico, el cual repite una forma de onda corta por medio de una línea de retraso filtrada con el fin de simular o imitar un sonido pulsado de cuerda. Este algoritmo se basa en el concepto de síntesis por guíaonda digital (*Digital waveguide synthesis*), siendo una extensión de la síntesis por tabla de onda (*wavetable synthesis*), en donde el contenido de la tabla cambia o evoluciona con el tiempo. Una vez la muestra es leída, la tabla de onda cambia y un filtro pasa bajos aplica el decaimiento del tono (Cáceres, 2007; Karplus y Strong, 1983; Mendoza, 2014; Minghini y Miyara, 2009; Villacorta y Marchiaro, 2006).



**Figura 1.20:** Implementación del algoritmo Karplus Strong. Imagen tomada de Smith (2010)


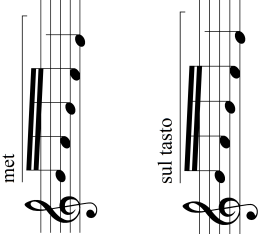
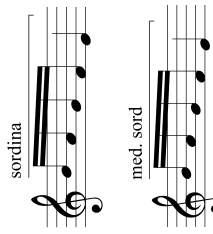
## 1.9. Estudio técnico de la bandola

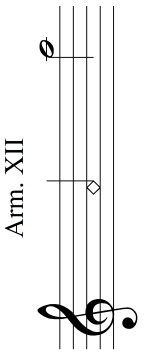
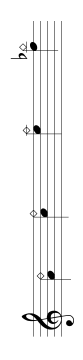
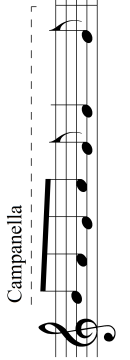
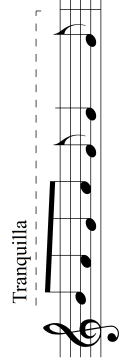


En esta primera versión de *Simbiosis* se hizo uso de un instrumento de cuerda pulsada, la bandola andina colombiana, el cual es tocado con plectro. Es por esto que la síntesis de modelado físico se enfocó en el algoritmo Karplus-Strong. La bandola andina tiene un corto proceso de formación en comparación con otros instrumentos académicos, es por esto que no posee mucho reconocimiento en el ámbito de la composición puesto que mucho del repertorio proviene de la mandolina, bandurria, cavaquiño, violín etc (Bernal, 2003; Varela, 2014). Es por esto que es pertinente abordar este instrumento desde nuevas perspectivas de concebir la música y el sonido, con el fin de explorar, experimentar y ampliar el desarrollo del instrumento. La bandola es un instrumento soprano actualmente afinado en 440 Hz en la tonalidad de do, posee 12 cuerdas en 6 ordenes dobles afinadas de la siguiente manera:

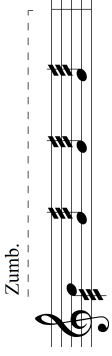
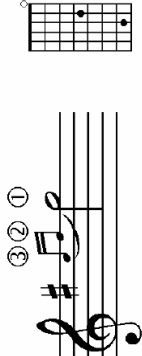
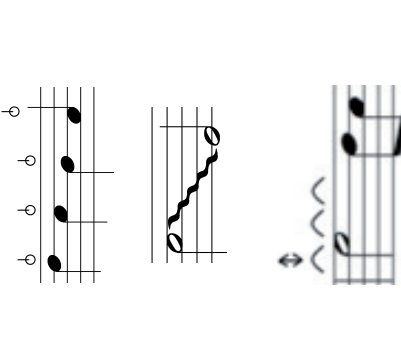


**Figura 1.21:** Registro y afinación de la bandola andina colombiana. Imagen tomada de Cortés y Bernal (1998)

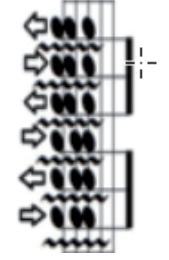
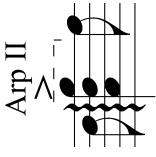
**Tabla 1.7:** Imágenes y conceptos extraídos de Bernal (s.f.), Varela (2014), Stone (1980) y Tello (2001)

Técnica	Descripción	Notación
Plectros	Metal, plástico y madera	
Regiones de ataque	<p>Hacia el puente, sonoridad metálica.</p> <p>Región de la boca, sonoridad normal.</p> <p>Sul tasto (sobre los trastes), sonido más dulce.</p>	
	<p><b>Pulsado</b></p> <p><b>Sordina:</b> se produce al colocar la región del carpo sobre las cuerdas del puente y pulsar con el plectro para lograr un sonido apagado y de corta duración</p> <p><b>Media sordina:</b> lo mismo que lo anterior solo que se levanta la mano una vez producido el sonido</p>	

<p>Por intervención simultánea y/o alternativa del plectro y otro elemento de la mano</p>	<p><b>Armónicos Naturales:</b> trastes XII (octava), VII (quinta com- puesta), y V (dos octavas)</p> <p><b>Armónicos Artificiales</b></p> <p><b>Campanella:</b> se produce por acción simultánea con el plectro y el paso de la uña del dedo medio por detrás del plectro</p> <p><b>Tranquilla:</b> producción de dos o más sonidos mediante la pul- sación de una cuerda con el plectro simultánea o alternativa- mente con la pulsación de otra cuerda por los dedos índice o medio</p>	   
<p>Por ataque controlado</p>	<p><b>Tremolo</b></p> <p><i>Controlado:</i> con subdivisión exacta</p> <p><i>Libre o cerrado:</i> cuando se busca una sonoridad constante y se hace una ligera flexión del dedo pulgar para que el plectro incida sobre las cuerdas en cierto ángulo diagonal</p>	 

	<p><b>Zumbido:</b> cuando el ángulo se exagera hasta que la incidencia del plectro es prácticamente perpendicular a las cuerdas, se genera mucho ruido de la frotación. Mejor logrado en sonidos graves</p>	
<p>Por cambio de la articulación</p>	<p><b>Transparencia:</b> producir apoyaturas, acciatauras y mordentes rectos mediante la distribución de sonidos en varias cuerdas. Se llega a producir pequeños clusters</p> <p><b>Trino sin articular:</b> consiste en pisar separadamente cada cuerda de un mismo orden y tremolar el plectro</p>	
<p>Efectos sobre las cuerdas</p>	<p><b>Pizzicato Bartók o slap pizzicato:</b> se logra al hacer rebotar la cuerda contra el diapason del instrumento</p> <p><b>Glissando:</b> consiste en pasar rápidamente de un sonido a otro, haciendo que se escuchen todos los sonidos intermedios en lo posible, se hace deslizando sobre la cuerda con el mismo dedo</p> <p><b>Vibratos verticales:</b> se produce realizando un movimiento vertical sobre la cuerda produciendo un sonido oscilante de la nota tocada.</p>	

**Arpa:** atacar las cuerdas detrás del puente o detrás del hueso de la cabeza



**Rasgueos:** se ejecuta con movimientos rápidos arriba y abajo. Se tiene en cuenta ritmo, efecto y dinámica del rasqueo.

También se puede ejecutar con las cuerdas tapadas

**Pizzicato de mano izquierda:** se realiza al pulsar las notas indicadas con los dedos de la mano izquierda.



**Sweep picking o barrido:** se tocan una sucesión de notas con mucha rapidez sobre cuerdas consecutivas con el mismo movimiento



**Lija:** raspar la cuerda con el plectro en forma diagonal a esta, con el borde del plectro. Efecto que proviene del violín.



**Scordatura:** es un concepto italiano que traduce "afinación incorrecta", se habla de scordatura cuando se altera la afinación convencional de un instrumento.

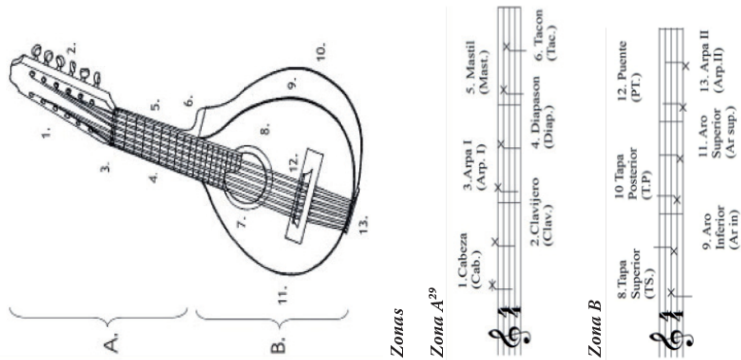


**Zona A**

1. Cabeza: Poca resonancia, poco sonido.
2. Clavijero: Poca resonancia, poco sonido
3. Arpa i: Brillante, poco resonante.
4. Diapasón: Resonante, con variedad de matices.
5. Mástil: Efectos de carácter seco y resonante.
6. Tacón: Efectos de carácter seco, poco resonante, pocos matices.

**Zona B**

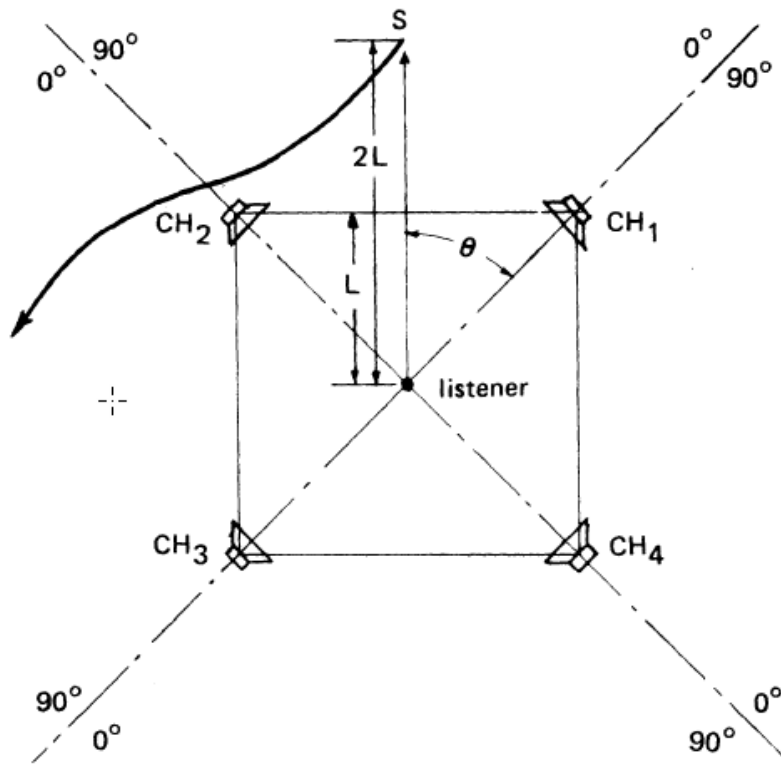
1. Boca: Efectos resonantes, variedad de matices.
2. Tapa superior: Variedad tímbrica (se puede percudir con los dedos, las uñas, dando otro timbre) resonante, definido, variedad de matices.
3. Aro inferior: Variedad tímbrica, seco, poco resonante, variedad de matices.
4. Tapa posterior: Variedad tímbrica, oscuro, resonante, variedad de matices.
5. Aro superior: Variedad tímbrica, seco, poco resonante, variedad de matices.
6. Puente: Seco, resonante, variedad de matices.
7. Arpa ii: Brillante, poco resonante, poco sonido.



### 1.10. Fuentes aparentes de ambientes virtuales

En composición algorítmica también se suele tratar el espacio por medio de la simulación de fuentes aparentes o ilusorias en ambientes virtuales y su desplazamiento en el espacio. Para el presente proyecto se hará uso del sistema cuadrafónico, el cual surgió en los años 60, y consiste en la reproducción de señales por medio de cuatro parlantes que forman un cuadrado.

En Figura 1.22, se ilustra un sistema cuadrafónico en el cual un espacio de  $360^\circ$  se divide en cuatro cuadrantes, donde cada par de altavoces está en un ángulo de  $90^\circ$  con respecto al oyente.  $S$  representa el movimiento de un sonido cualquiera, y  $L$  la distancia entre el oyente y el punto medio entre dos altavoces (Chowning, 1971).



**Figura 1.22:** Configuración de altavoces que definen espacio ilusorio y un espacio de escucha. Imagen tomada de (Chowning, 1971)

Para que un oyente localice una fuente de sonido real en un espacio cerrado, este requiere dos tipos de información:

1. Aquella que define la localización angular de la fuente con respecto al oyente:

- El tiempo de llegada o retraso de la señal en las dos orejas cuando la fuente no está centrada o detrás del oyente.
- Las diferencias de nivel de presión de la energía de alta frecuencia en las dos orejas como resultado del efecto de sombra de la cabeza cuando la fuente no está centrada.

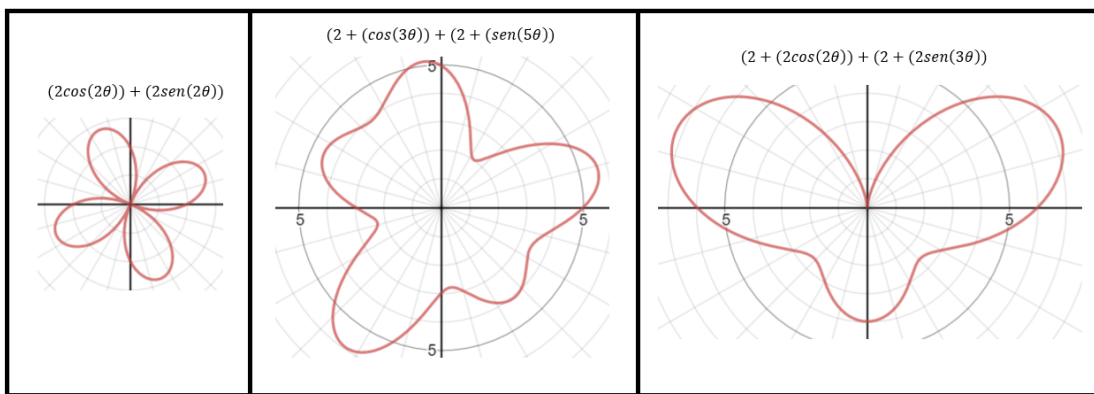
2. Aquella que define la distancia de la fuente del oyente:

- La relación entre la energía directa y la energía indirecta o reverberante, donde la intensidad del sonido directo que llega al oyente disminuye más fuertemente con la distancia que el sonido reverberante.
- La pérdida de componentes de frecuencia de baja intensidad de un sonido con una distancia creciente del oyente.

Las entidades sónicas realizan un recorrido en este espacio virtual por medio de ecuaciones polares, la ecuación que define su trayecto es la siguiente:

**Generalización de las definiciones de cardoides, caracolooides rosas y lemniscatas** (Larson y cols., 1999). Extraída de Sánchez (2017a)

$$(a_1 + (b_1 \cos(c_1\theta))) + (a_2 + (b_2 \sin(c_2\theta))) \quad (1.4)$$



**Figura 1.23:** Ejemplos de particularización de la ecuación 1.4. Imagen tomada de (Sánchez, 2017a)

## Proceso compositivo, parámetros técnicos y estructurales del sistema *Simbiosis*

---

*Es bien sabido que el corazón tiene que ser regular, de lo contrario morimos. Pero el cerebro tiene que ser irregular; de lo contrario tenemos epilepsia. Esto muestra que la irregularidad, el caos, conduce a sistemas complejos. No se trata de desorden. Por el contrario, yo diría que el caos posibilita la vida y la inteligencia.-Traducción propia- (Alimena y El-Homsi, 2015)*

-Ilya Prigogine -

### 2.1. Estructura del Sistema

*Simbiosis* es un sistema dinámico<sup>1</sup> en el cual participan 3 agentes: las entidades sónicas, el instrumentista y el mentor. La figura 2.1 describe el comportamiento del sistema en una interpretación, su flujo de información y la relación entre los agentes. La siguiente notación indica distintos tipos de vínculos existentes en el sistema:

- La línea punteada con flecha indica que el agente tiene control sobre la información u otro agente.
- La línea constante con flecha indica que ese agente tiene una relación con otro agente o algún dispositivo, pero no ejerce control directo sobre su información.
- La línea con rombo indica simplemente flujo de información.

---

<sup>1</sup>Es decir, que su estado evoluciona en el tiempo y esta conformado por un conjunto de elementos que interactúan entre sí (Katok y Hasselblatt, 1997).

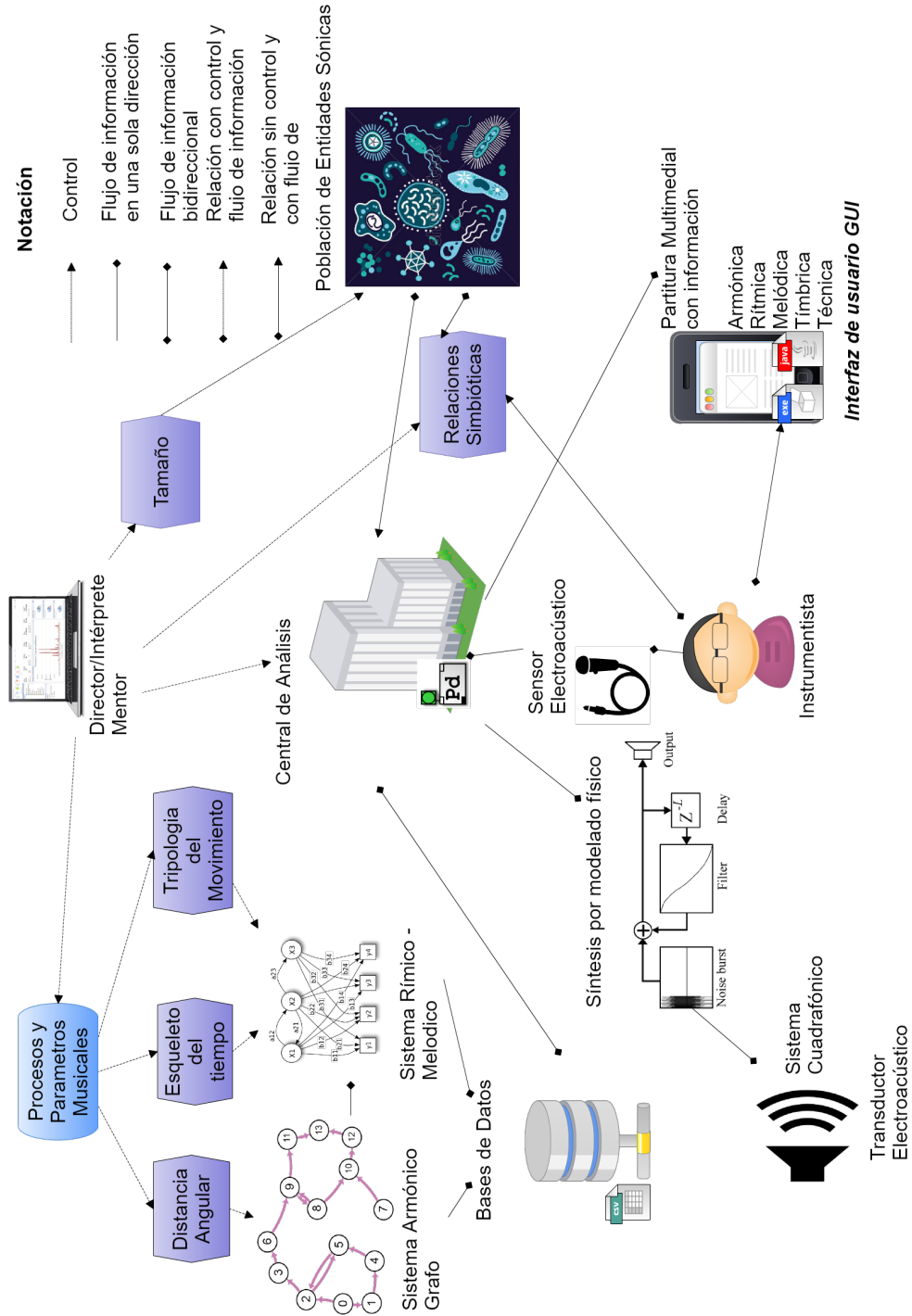


Figura 2.1: Estructura del Sistema Simbiosis

## 2. PROCESO COMPOSITIVO, PARÁMETROS TÉCNICOS Y ESTRUCTURALES DEL SISTEMA *SIMBIOSIS*

---

A continuación se describen cada uno de los componentes del sistema:

- Bases de datos: aquí están contenidos en archivos .cvs<sup>1</sup> y .txt toda la información referente al sistema armónico y al sistema rítmico, los cuales no son mas que tablas de datos que son leídas por la central de análisis.
- Central de Análisis: desde acá se transmite y modifica la información que fluye en todo el sistema. También se convierten los datos numéricos en sonido y están contenidos los parámetros que constituyen a las entidades sónicas.
- Mentor/Director: Este agente es quien gobierna y controla gran parte de la información del sistema; tiene control del sistema armónico, melódico y rítmico ya sea escogiendo el campo armónico o restringiendo los parámetros rítmico-melódicos en tiempo real. También tiene control del tamaño de la población de las entidades sónicas y de sus parámetros de inicialización. Todo lo anterior por medio de un dispositivo que se comunica con la central de análisis.
- Instrumentista: Al ser *Simbiosis* una composición para instrumento indeterminado, existe la posibilidad de que sea ejecutada con diferentes instrumentos, para lo cual debe cargarse en la base de datos la información referente al instrumento que se va usar (posibilidades técnicas, timbricas, afinación, entre otras).
- Entidades Sónicas: este agente, al poseer cierto grado de autonomía tiene control de la central de información en lo que respecta a sí mismo, es por esto que el flujo de información con la central de análisis es representado con una línea bidireccional. Además, la relación que tiene con el instrumentista, es una relación en la cual fluye información pero no existe control directo del uno sobre el otro, en otras palabras, el instrumentista y la población de entidades sónicas intercambian información sonora y se retroalimentan, pero la población de entidades sónicas no puede alterar o modificar lo que debe interpretar el instrumentista y viceversa. Por otro lado, los datos o información de las entidades sónicas son transformados en sonido por medio de síntesis por modelado físico.
- Sistema Cuadrafónico: Es el espacio acústico y *biotopo*<sup>11</sup> *virtual* en donde conviven y se desplazan las entidades sónicas junto con el material sonoro producido por el instrumentista. En este espacio acústico el mentor distribuye a gusto efectos de sonido que alteran y modifican a las entidades sónicas cuando estas pasan o recorren el lugar donde están dispuestos estos efectos.

---

<sup>1</sup>Valores separados por comas, en inglés *Comma-separated Values*, es un archivo que representa datos en forma de tabla, en donde las columnas son separadas por comas. Es usado para el intercambio y conversión de datos entre programas (Shafranovich, 2008).

<sup>11</sup>del griego βίος bios, vida y Τόπος topos, lugar, área de condiciones ambientales uniformes que provee espacio vital a un conjunto de organismos (Haeckel y cols., 1887; Udvardy, 1959).

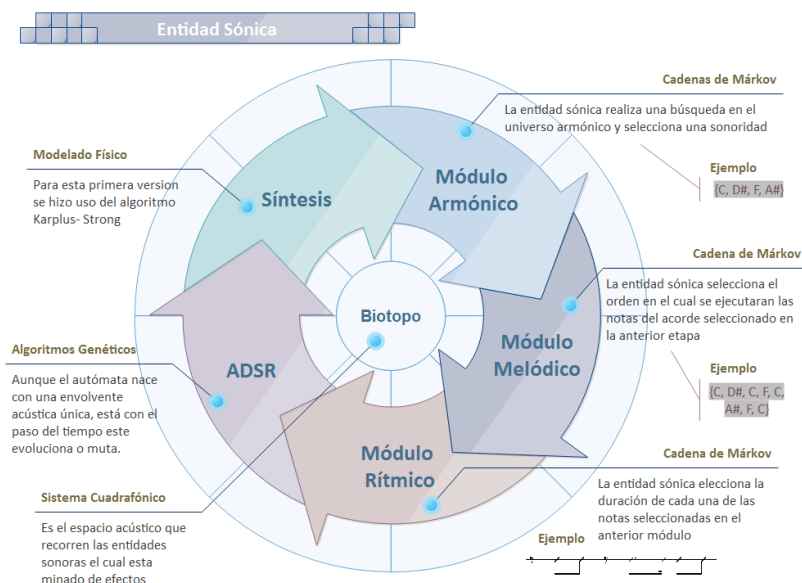
---

## 2.2. Entidades sónicas

*An intelligent entity could be made of protein, mechanical relays, transistors, or anything else, so long as it can process symbols<sup>1</sup> (Nilsson, 1998)*

Artificial Intelligence: A New Synthesis, -Nils J. Nilsson-

Varios autores han acogido y usado el concepto de entidad/máquina sónica/sonora autónoma, las cuales son modelos computacionales de seres virtuales capaces de interrelacionarse y modificarse entre sí mismos para alterar el entorno acústico. Castañeda (2016) realizó una tipología de las máquinas sonoras, las entidades sonoras se ubican dentro de los sistemas híbridos puesto que tienen la característica de las máquinas teleológicas en cuanto a que tienen una estructura lingüística (bases de datos de universos armónicos), son autónomas ya que actúan por periodos extensos sin la intervención humana, se mueven por sí mismas por el entorno sin la intervención humana. Por otro lado, los métodos/algoritmos evolutivos/genéticos permiten generar música no-determinista o que ocurren de forma diferente cada vez que es interpretada. La imagen 2.2 ilustra el funcionamiento de una *Entidad Sónica*.



**Figura 2.2:** Funcionamiento de una entidad sónica

<sup>1</sup>Una entidad inteligente puede estar hecha de proteínas, relés mecánicos, transistores, o cualquier otra cosa, siempre y cuando pueda procesar símbolos

### 2.3. Parámetros y procesos de estructuración musical

*Programar es (meta)componer. La labor de diseñar algoritmos que generen música —o cualquier otro tipo de producto artístico— implica gran cantidad de decisiones que comportan una visión estética. [...] Al programar no se compone música, pero sí se establecen marcos y espacios en los que existe música potencial. En este sentido, la programación se convierte en un acto de metacomposición (López-Montes, 2013)*

-José López-Montes -

*Simbiosis* fue meta-compuesto de forma modular en distintos lenguajes y entornos de programación (*Pure Data* y *Phyton*) haciendo uso de los conceptos, modelos matemáticos y algoritmos descritos en el marco teórico con el fin de depurar la información en listas o bases de datos. A continuación se describen cada uno de los módulos.

#### 2.3.1. Estructura formal de la obra y performance

El desarrollo del *performance* o la obra *Simbiosis* tiene 4 etapas, las cuales están inspiradas en la curva de crecimiento bacteriano. En la primera fase el director decide con cuantas entidades desea iniciar y se mantiene estable esa cantidad por el tiempo que el lo indique. Posteriormente le sigue una fase exponencial y una estacionaria en la cual la población de entidades crece conforme a la ecuación de Monod:

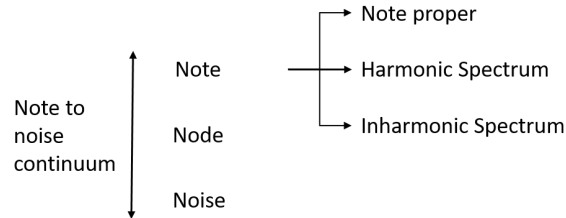
Ecuación de Monod

$$\mu = \mu_{max} \frac{X}{K_x + X} \quad (2.1)$$

Donde  $\mu_{max}$  representa la tasa máxima de crecimiento, es decir el número máximo de entidades sónicas al que puede llegar la población, esto lo establece el director al inicio del *performance*.  $K_s$  corresponde a la constante de velocidad media, es decir la velocidad a la cual crece la población.

Adicionalmente, la forma, el desarrollo y los procesos de estructuración de la obra responde a búsquedas relacionadas a la espectro-morfología, las cuales se desarrollan en tiempo real. Estas búsquedas están inspiradas en la clasificación de la tipología espectral planteada por Smalley la cual es ilustrada en la figura 2.3. Las búsquedas se dan por medio de la clasificación de las técnicas del instrumento, la alteración del timbre en las entidades, y el uso de efectos de sonido.





**Figura 2.3:** Tipología espectral planteada por Smalley (1997)

### 2.3.2. Universos armónicos - módulo armónico

*Simbiosis* contiene una lista de tablas con algunas de las escalas más conocidas, a las que se les extrajeron sus respectivos subconjuntos, se les calculó su respectivo SPECTRA y posteriormente la distancia angular entre ellos, realizando también una depuración con respecto a su vector interválico para suprimir las transposiciones de las escalas. Para calcular los posibles combinaciones de un conjunto de  $n$  cardinalidad se hace uso de la fórmula de combinaciones sin repetición, o combinación de  $n$  objetos tomando  $r$  a la vez (Kolman y cols., 1997; Ross y Wright, 1992).

Combinación sin repetición

$$\frac{n!}{r!(n-r)!} \quad (2.2)$$

Para calcular el total de subconjuntos de un universo armónico, se hace uso de la ecuación anterior pero añadiéndole una sumatoria que recorre las cardinalidades deseadas<sup>1</sup>:

$$\sum_{r=i}^{n-1} \frac{n!}{r!(n-r)!} \quad (2.3)$$

Supongamos el siguiente ejemplo con la escala octatónica.



**Figura 2.4:** Escala octatónica

Si se consideran conjuntos de tres clases tónicas hasta seis clases tónicas, hay 219 subconjuntos en total: 1 octacordios, 8 heptacordios, 28 hexacordios, 56 pentacordios,

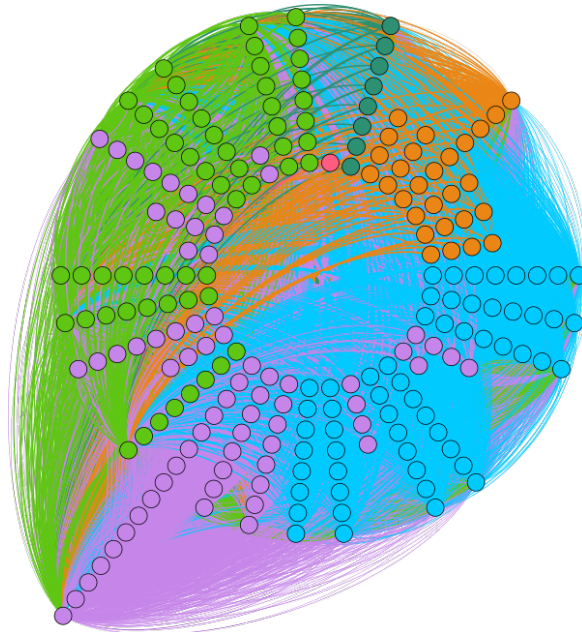
<sup>1</sup>Ecuación extraída de Sánchez (2017b)

## 2. PROCESO COMPOSITIVO, PARÁMETROS TÉCNICOS Y ESTRUCTURALES DEL SISTEMA *SIMBIOSIS*

---

70 tetracordios y 56 tricordios. Puesto que el volumen de datos es considerablemente grande, calcular el SPECTRA y la distancia angular entre todos estos conjuntos sería una tarea bastante laboriosa, nada más la cantidad de relaciones entre los subconjuntos (su distancia angular) llega a las 47962 posibilidades. Es por esto que se hace necesario el uso de herramientas computacionales que realicen estos cálculos, para este proyecto se hizo uso de *Python*.

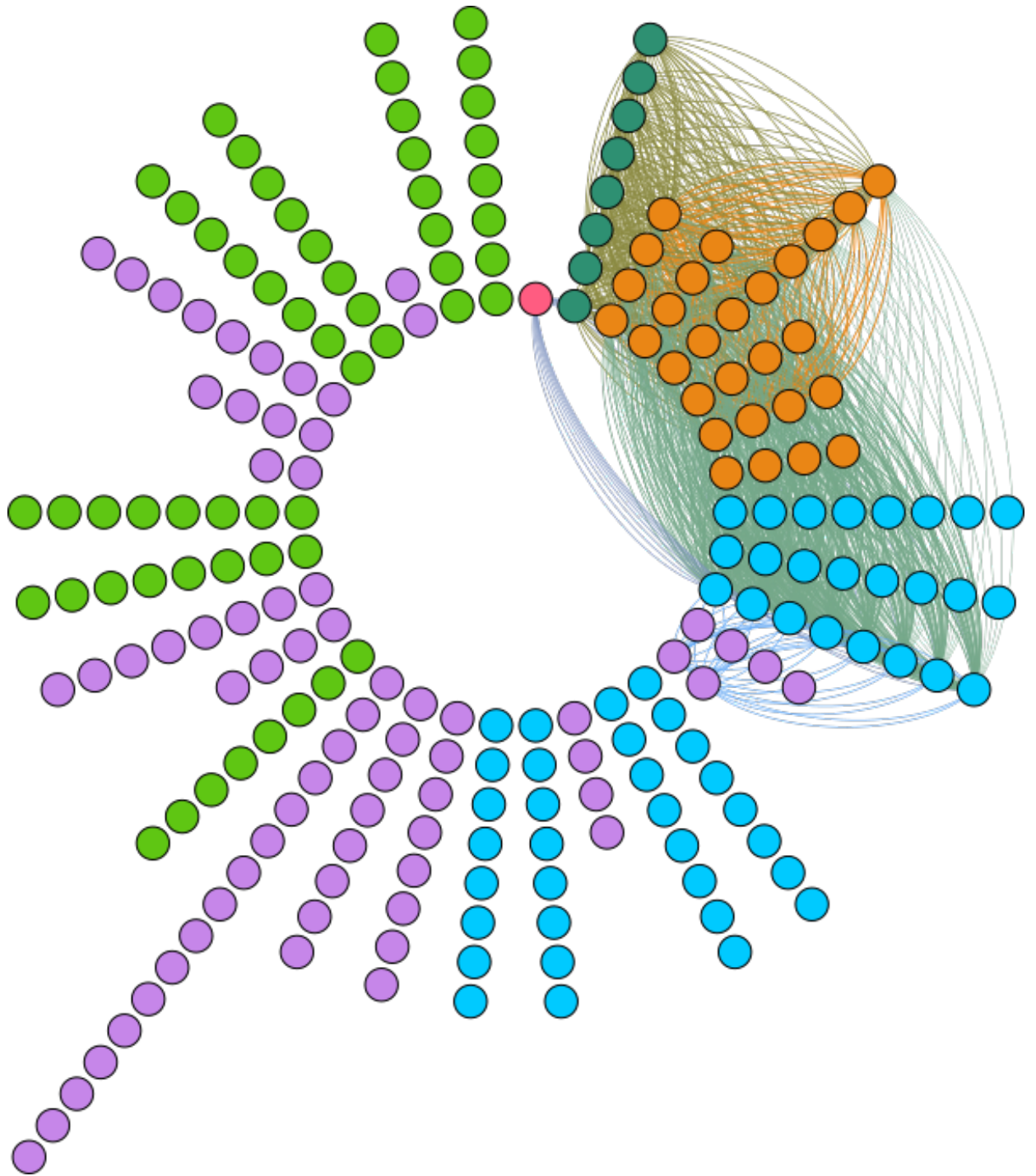
Para la anterior escala, a continuación se ilustra su respectivo grafo:



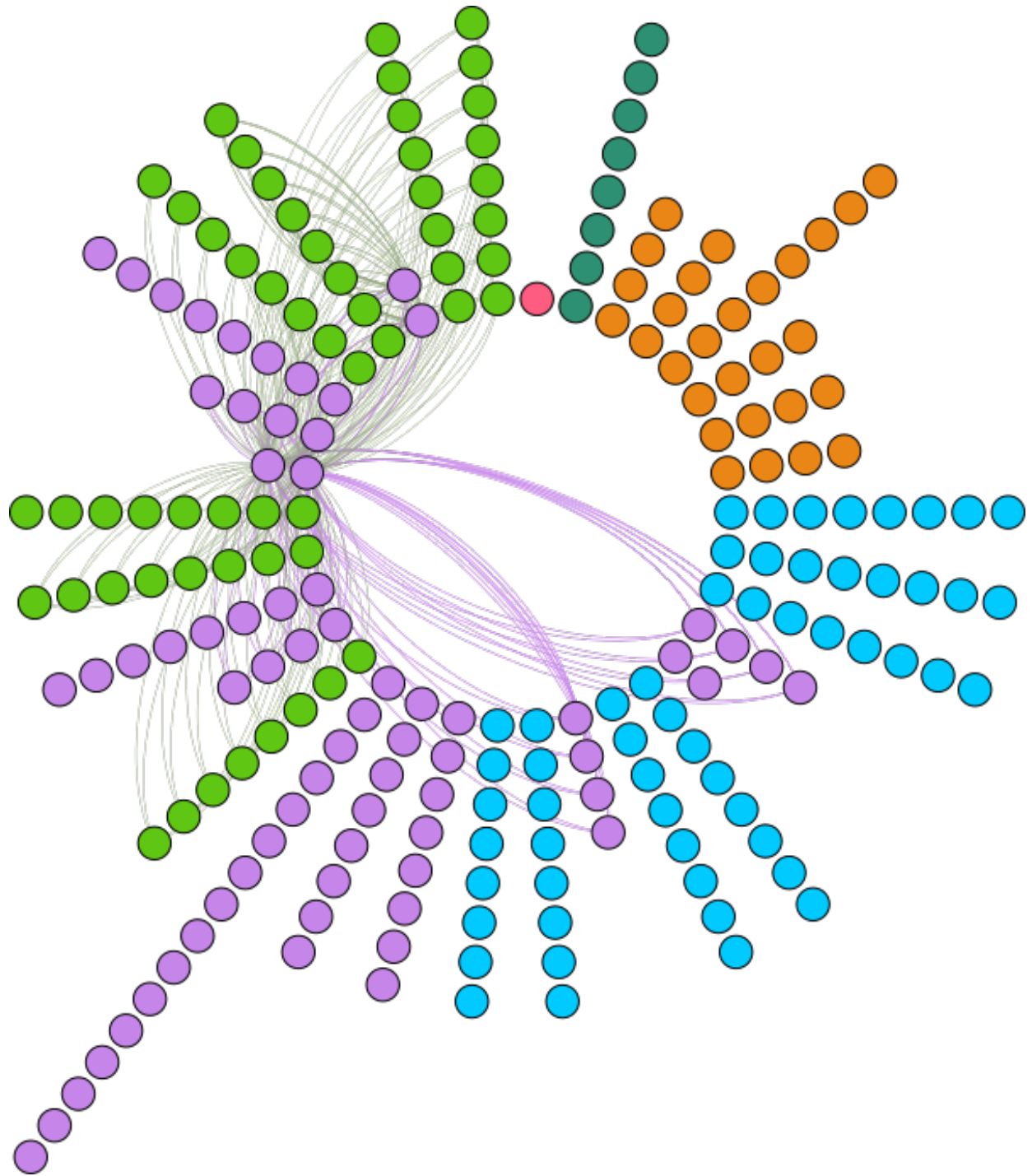
**Figura 2.5:** Grafo escala octatónica. En donde se ilustran todos los 219 subconjuntos o sonoridades agrupadas por vector interválico, a cada cardinalidad se le asignó un color tal y como se ilustra en la tabla, por ejemplo, los tetracordios son nodos de color purpura, los pentacordios de color azul, los hexacordios de color anaranjado etc.

3	25.57 %
4	31.96 %
5	25.57 %
6	12.79 %
7	3.65 %
8	0.46 %

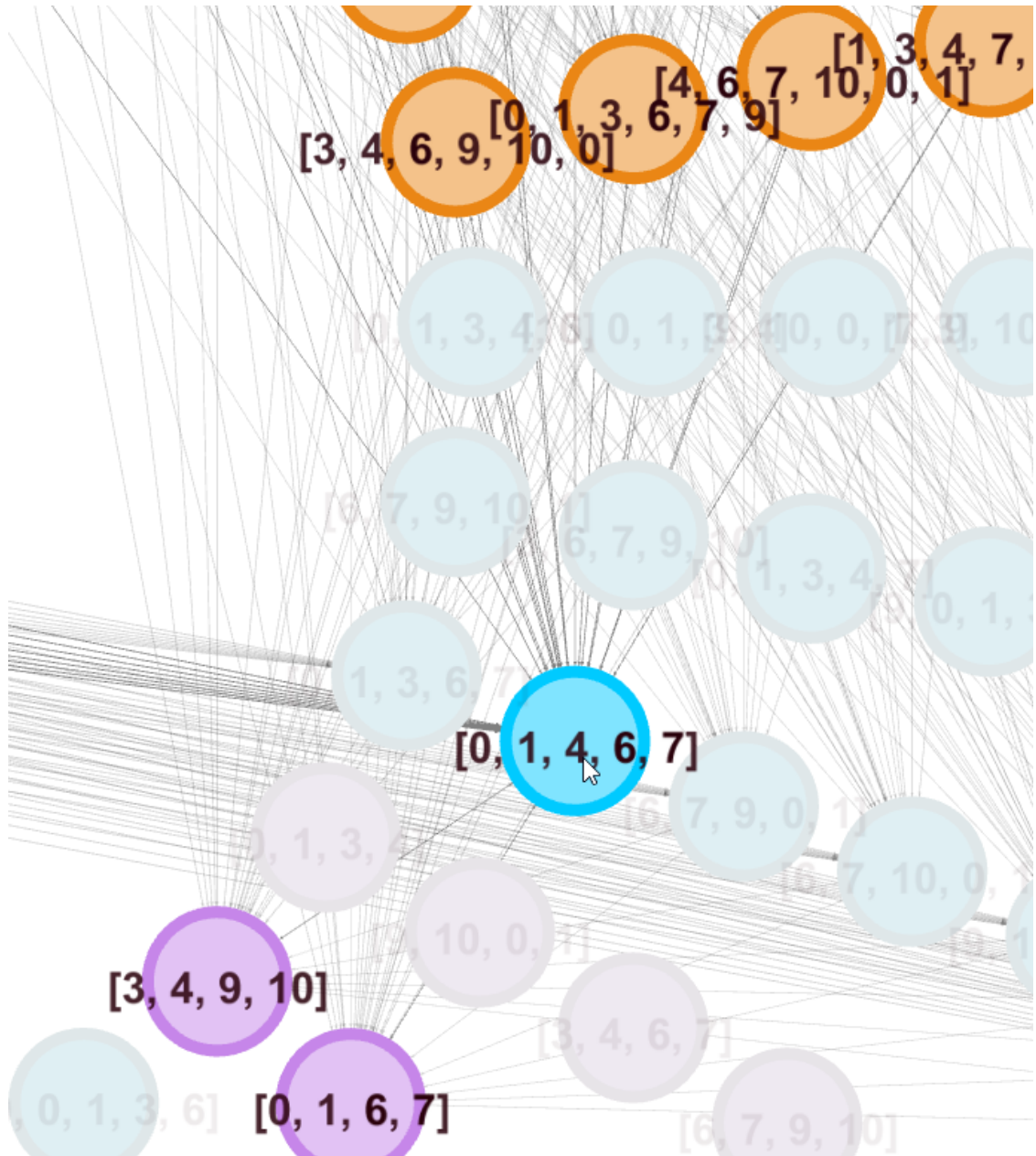
**Tabla 2.1:** El color esta relacionado con la categorización de tricordio, tetracordio, pentacordio, hexacordio, heptacordio y octacordio. El porcentaje detalla la cantidad de cada uno de los anteriores grupos en el grafo.



**Figura 2.6:** Grafo escala octatónica con una restricción de  $0^\circ$  a  $11^\circ$ . Es decir solo aparecen las conexiones posibles entre nodos que tienen una distancia angular entre  $0^\circ$  y  $11^\circ$ .



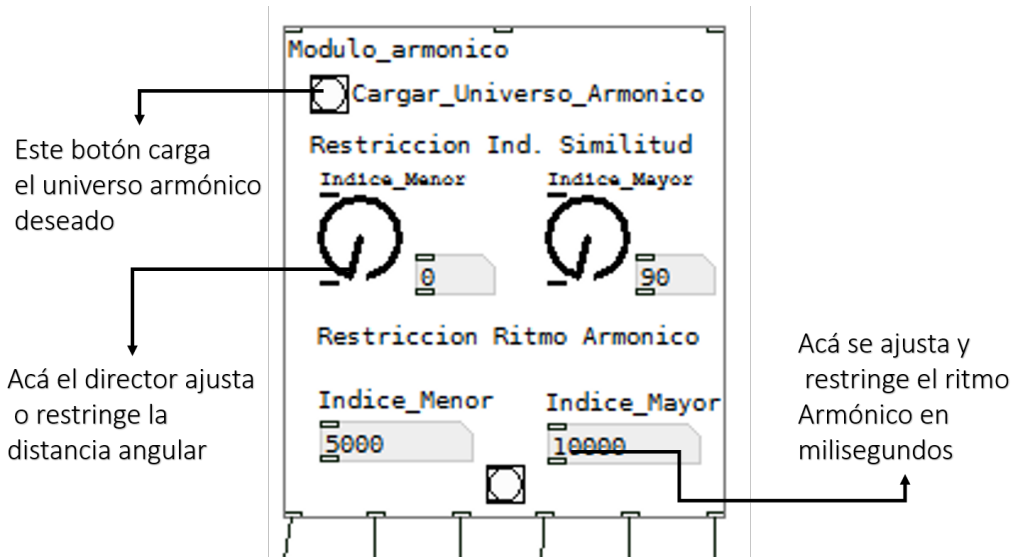
**Figura 2.7:** Grafo escala octatónica con una restricción de  $80^\circ$  a  $90^\circ$ .



**Figura 2.8:** Algunas posibilidades de conexiones en el grafo escala octatónica con una restricción de  $8^\circ$  a  $14^\circ$ , El conjunto de partida es  $[0,1,4,6,7]$ , se ocultan los conjuntos a los cuales no puede direccionarse y se resaltan los conjuntos a los cuales sí puede dirigirse.

## 2. PROCESO COMPOSITIVO, PARÁMETROS TÉCNICOS Y ESTRUCTURALES DEL SISTEMA *SIMBIOSIS*

---



**Figura 2.9:** GUI interfaz de usuario del módulo armónico en *Pure Data*

En la figura 2.9 se ilustra la interfaz gráfica del módulo armónico programado en Pure Data, el cual tiene el siguiente funcionamiento:

1. El director carga el universo armónico deseado, esto es, la escala la cual quiere que las entidades sónicas recorran (escala mayor, menor, tonos enteros, octatónica, pentatónica, etc...)
2. Se establece el ritmo armónico en milisegundos, cada cuánto se quiere que cambien las sonoridades, esto puede variar en el transcurso de la obra y también se puede asignar un ritmo armónico diferente para cada entidad sónica.
3. Se inicia la búsqueda y/o el recorrido, es decir, cada entidad sónica empieza a recorrer el universo armónico por medio de cadenas de Márkov.
4. Cada entidad sónica recorrerá el espacio armónico de forma autónoma y serán arrojados en forma de conjuntos al siguiente módulo en forma de un vector o arreglo de números enteros.

### 2.3.3. Tipología del movimiento - módulo melódico

Como parte de los mecanismos programados para las entidades sónicas en *Simbiosis*, el control a través de las definiciones de movimiento mencionadas en la tipología del movimiento planteada por Smalley, permite la selección de comportamientos asignados a la generación de melodías. Supongamos que el mentor propone que las entidades usen comportamientos ascendentes unidireccionales, para lo cual las entidades cuentan con un listado como el que se encuentra en la 2.10, a través de una escogencia aleatoria un resultado posible es el representado en la 2.11.

1. Para el movimiento plano, es escoge de forma aleatoria alguna de las notas del conjunto y se repite hasta cambiar la sonoridad o acorde.
2. Para los movimientos ascendentes y descententes, se calculan las posibles permutaciones sin repetición y importando el orden, por medio de la ecuación:

Permutan sin repetición, importa el orden.

$$\frac{n!}{(n-r)!} \quad (2.4)$$

Sus posibles permutaciones en movimiento melódico ascendente serían:

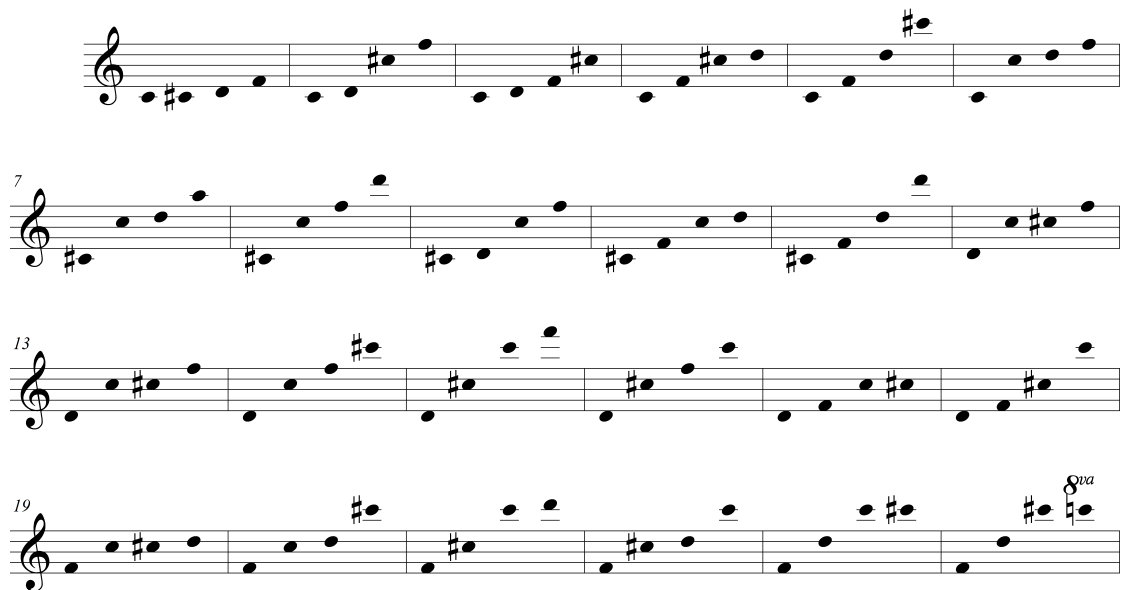


Figura 2.10: Permutaciones de una melodía ascendente

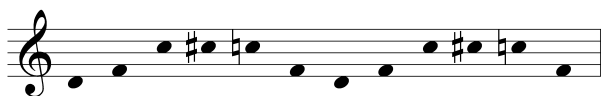
## 2. PROCESO COMPOSITIVO, PARÁMETROS TÉCNICOS Y ESTRUCTURALES DEL SISTEMA *SIMBIOSIS*

---



**Figura 2.11:** Ejemplo de una melodía ascendente

3. El movimiento parabólico normal e invertido corresponde a la unión de un movimiento ascendente con un descendente o viceversa. A continuación se ejemplifica este movimiento con el mismo conjunto del item anterior.







**Figura 2.15:** Convergencia melódica

7. Dilatación y contracción melódica: Schillinger (1948) propone un proceso de expansión y contracción melódica, el cual consiste en multiplicar o dividir por  $x$  valor los intervalos presentes en determinada melodía. La figura 2.16 ilustra un proceso de dilatación de una melodía, en donde se multiplican los intervalos por un factor de 2 y posteriormente de 3.



**Figura 2.16:** Expansión melódica. Imagen tomada de Schillinger (1948)

8. Convolución: en matemáticas una convolución es un operador matemático que transforma dos funciones  $f$  y  $g$  en una tercera función. A veces es útil ver la convolución como un producto matricial, como una matriz de *Toeplitz*, la cual es una matriz cuadrada en la que los elementos de sus diagonales (de izquierda a derecha) son constantes (Von Zur Gathen y Gerhard, 2013). Una matriz de *Toeplitz* presenta la siguiente estructura:

$$A = \begin{bmatrix} a_0 & a_{-1} & a_{-2} & \dots & \dots & a_{-n+1} \\ a_1 & a_0 & a_{-1} & \ddots & & \vdots \\ a_2 & a_1 & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & a_{-1} & a_{-2} \\ \vdots & & \ddots & a_1 & a_0 & a_{-1} \\ a_{n-1} & \dots & \dots & a_2 & a_1 & a_0 \end{bmatrix}$$

**Figura 2.17:** Estructura matriz de *Toeplitz*. Imagen tomada de Gray y cols. (2006)

Existen diversas formas de crear convoluciones, a continuación se presentan las más comunes:

## 2. PROCESO COMPOSITIVO, PARÁMETROS TÉCNICOS Y ESTRUCTURALES DEL SISTEMA *SIMBIOSIS*

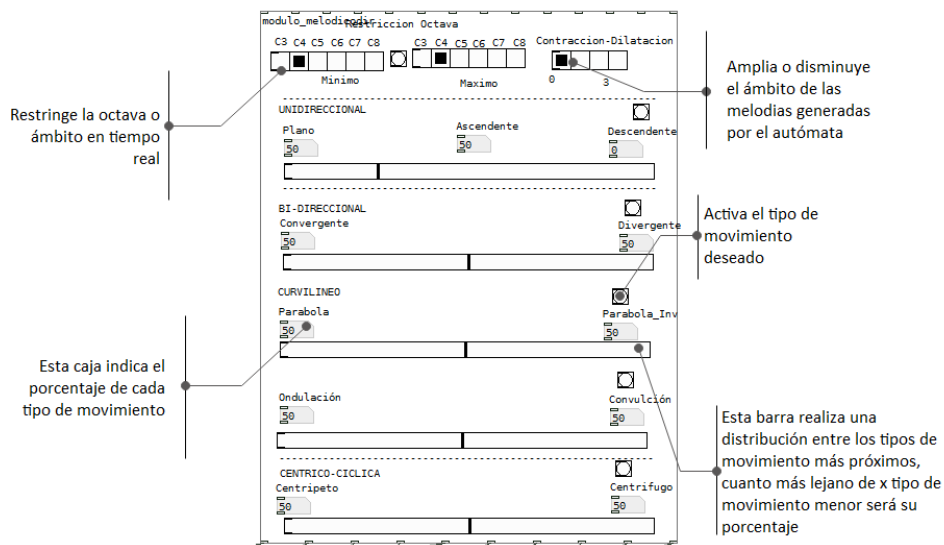
- Matriz de *Toeplitz* simétrica del conjunto [1,2,3] o [C#,D,Eb];

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & 2 \\ 3 & 2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C\# & D & Eb \\ D & C\# & D \\ Eb & D & C\# \end{bmatrix}$$

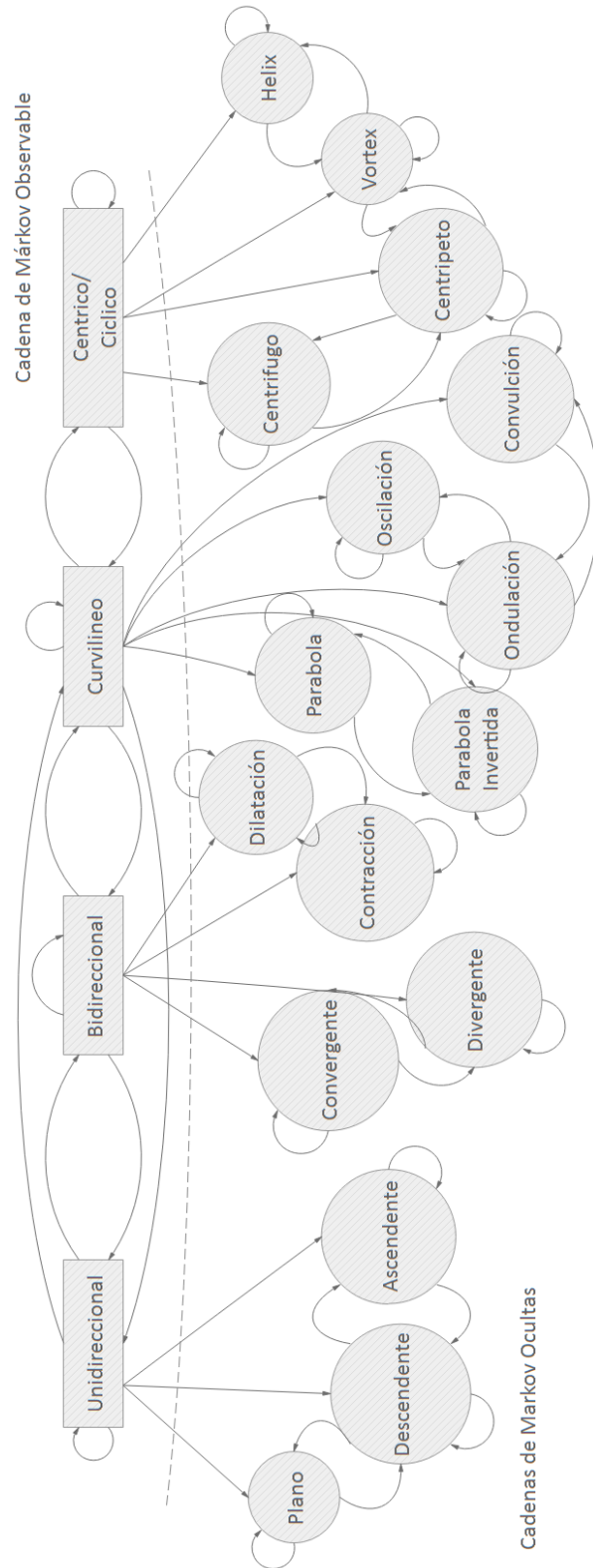
- Matriz de *Toeplitz* no simétrica con una columna y un vector de filas especificados.  $c = [1,2,3,4]$ ,  $f = [4,5,6]$ , o bien,  $c = [C\#,D,Eb,E]$ ,  $f = [E,F,F\#]$

$$\begin{bmatrix} 1 & 5 & 6 \\ 2 & 1 & 5 \\ 3 & 2 & 1 \\ 4 & 3 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C\# & F & F\# \\ D & C\# & F \\ Eb & D & C\# \\ F & Eb & D \end{bmatrix}$$

Los anteriores cálculos fueron realizados en *Matlab* el cual es una herramienta de software matemático que tiene integrado los algoritmos requeridos para solucionar las distintas matrices de *Toeplitz*. Todos los tipos de movimiento fueron guardados en listas las cuales son consultadas por la entidad sonora en *Pure Data*, la imagen 2.18 ilustra la interfaz de usuario que controla el director para direccionar la tipología de movimiento.



**Figura 2.18:** Interfaz de Usuario GUI del módulo melódico, en *Pure Data*



**Figura 2.19:** Cadena de Márkov tipología del movimiento. Este módulo tiene una cadena de Márkov observable (parte superior) y 4 cadenas de Márkov ocultas (parte inferior). En la parte observable se encuentran los tipos de movimiento propuestos por Smalley (1986) explicados en el capítulo 1.6.1. La cadena de Márkov está construida tal y como Smalley la concibió en la categorización que hizo de los tipos de movimiento. Es por esto que no se puede ir de un movimiento unidireccional al céntrico cíclico directamente sin pasar por el movimiento bidireccional y el curvilíneo. De igual manera no es posible pasar directamente de un movimiento unidireccional a un sub-estado como el movimiento centrífugo, puesto que éste último es un sub-estado del movimiento céntrico/cíclico.















































## 2. PROCESO COMPOSITIVO, PARÁMETROS TÉCNICOS Y ESTRUCTURALES DEL SISTEMA *SIMBIOSIS*

### 2.3.4. Esqueleto del tiempo - módulo rítmico

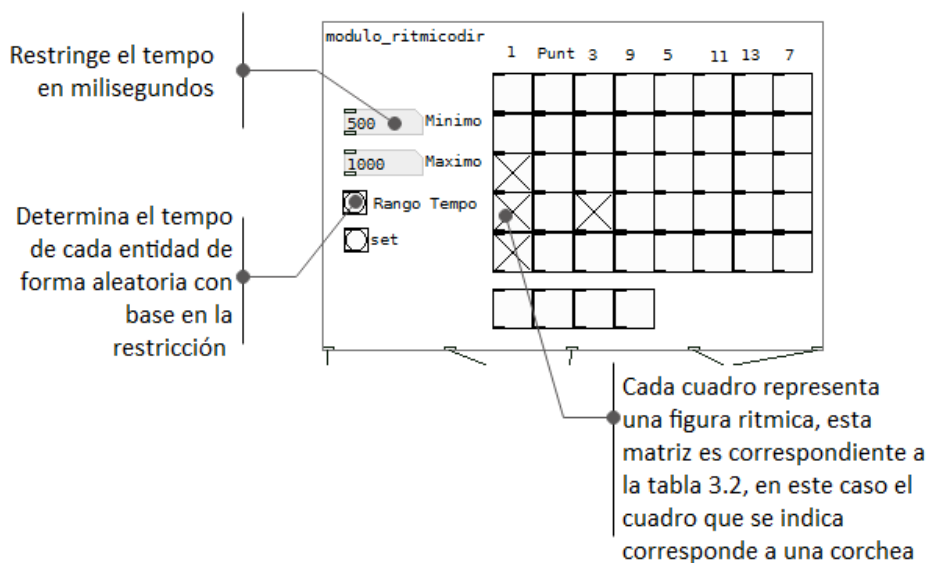
Para este módulo se realizó una clasificación de algunas posibilidades de proporciones rítmicas<sup>1</sup>, las cuales fueron guardadas en listas, y modeladas en una máquina de estado finito por medio de cadenas de Márkov. El director tiene la posibilidad de restringir en tiempo real las proporciones que desea usar.

La tabla 2.2 describe el estudio de las proporciones rítmicas desde la redonda hasta el tresillo de semifusa, este es un sistema de proporción móvil, es decir, el valor en milisegundos es variable. Para este caso se toma la negra con una duración de 1000ms (1 segundo). Y, en la figura 2.20 se ilustra la interfaz de usuario en *Pure Data*, en donde la caja numérica *Tempo negra* corresponde precisamente al ajuste del valor de la negra en milisegundos, y con respecto a esto se distribuyen las demás valores de duraciones a partir de las proporciones descritas en la tabla.

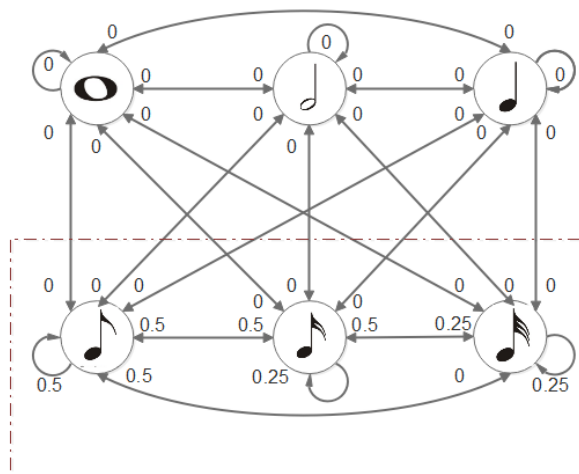
**Tabla 2.2:** Tabla de proporciones rítmicas

<b>Figura</b> <b>Proporción</b> <b>Valor (ms)</b>								
	1	8/9	4/5	3/4	8/11	2/3	8/13	4/7
	4000,00	3555,55	3200,00	3000,00	2909,09	2666,00	2461,53	2285,71
<b>Figura</b> <b>Proporción</b> <b>Valor (ms)</b>								
	1/2	4/9	2/5	3/8	4/11	1/3	4/13	2/7
	2000,00	1777,77	1600,00	1500,00	1454,54	1333,33	1230,76	1142,50
<b>Figura</b> <b>Proporción</b> <b>Valor (ms)</b>								
	1/4	2/9	1/5	3/16	2/11	1/6	2/16	1/7
	1000,00	888,88	800,00	750,00	727,27	666,66	615,38	571,42
<b>Figura</b> <b>Proporción</b> <b>Valor</b>								
	1/8	1/9	1/10	3/32	1/11	1/12	1/13	1/14
	500,00	444,44	400,00	375,00	363,63	333,33	307,69	285,71
<b>Figura</b> <b>Proporción</b> <b>Valor</b>								
	1/16	1/18	1/20	3/64	1/22	1/24	1/26	1/28
	250,00	222,22	200,00	187,00	181,81	166,66	153,84	142,85
<b>Figura</b> <b>Proporción</b> <b>Valor (ms)</b>								
	1/32	1/36	1/40	3/128	1/44	1/48		
	125,00	111,11	100,00	93,50	90,90	83,33		

<sup>1</sup>Creston (1964) tiene un estudio similar en su libro *Principles of Rhythm*



**Figura 2.20:** Interfaz de usuario GUI del módulo rítmico en *Pure Data*



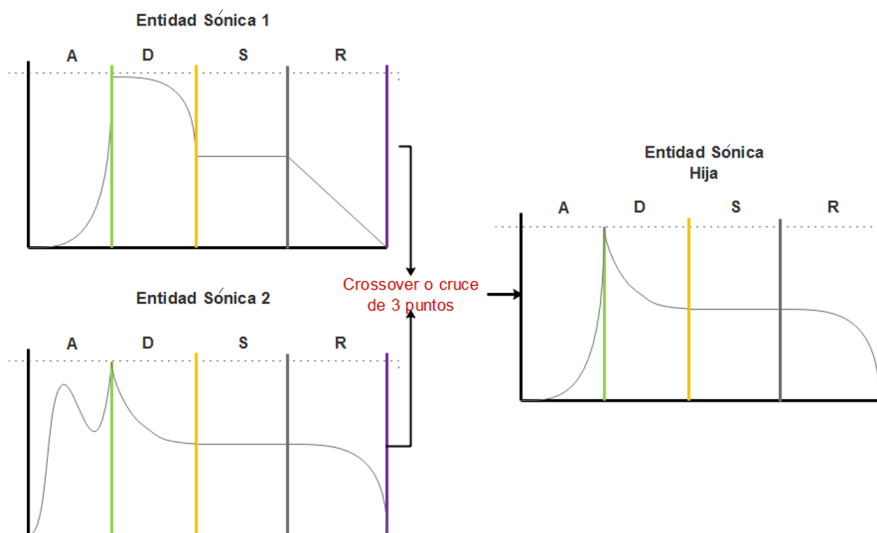
**Figura 2.21:** Cadena de Márkov del módulo rítmico con restricciones. (Estado = redonda, Estado 2 = Blanca, Estado 3 = Negra, Estado 4 = corchea, Estado 5 = semicorchea, Estado 6 = Fusa). Esta sería la cadena de Márkov de un autómata si el director escoge solamente proporciones enteras, y si restringe las posibilidades entre el 4to y el 6to estado. Es por esto que se encierra en un recuadro con línea segmentada los estados que el autómata recorrerá y las otras posibilidades fuera de este recuadro son nulas (0).

### 2.3.5. Envoltente acústica - módulo genético

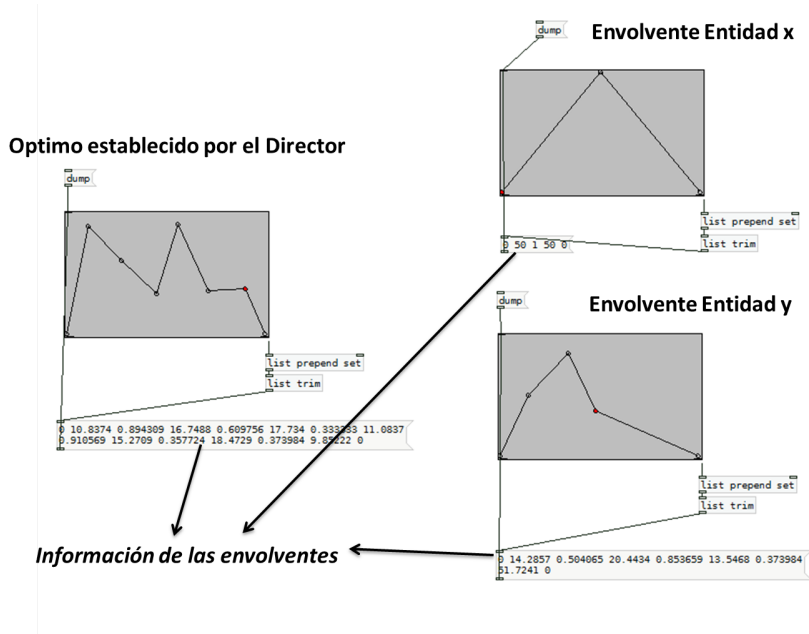
Algo que caracteriza a cada instrumento es su envoltente acústica, el cual es la variación de la amplitud y el contenido espectral de un sonido con respecto al tiempo (Dodge y Jerse, 1997; Dunn y cols., 2015; Sethares, 2005). En síntesis de sonido es común hacer uso de un *generador de envoltente*, el cual controla los distintos parámetros de un sonido, siendo los más comunes:

- Ataque: tiempo de entrada, lo que demora el sonido en escucharse desde que es ejecutado hasta que alcanza su máxima amplitud.
- Decaimiento: es el tiempo en que tarda en disminuir la amplitud hasta que se suelta la tecla o el punto de inducción vibratoria en el instrumento.
- Sostenimiento: tiempo en el cual la amplitud se mantiene constante.
- Relajación: tiempo en el cual el sonido disminuye toda su amplitud

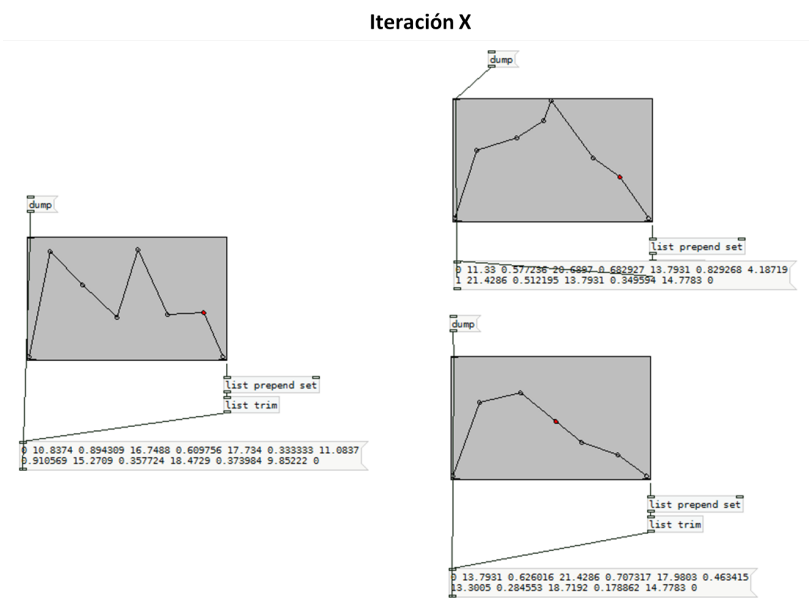
Para el presente proyecto, la envoltente acústica representa un atributo de cada entidad sonora, es lo que las distingue y diferencia entre ellas. Este atributo con el tiempo muta, se transforma o se recombina a partir de la interacción que exista entre ellas por medio de algoritmos genéticos o de una función de aptitud que establezca el director.



**Figura 2.22:** Crossover de 3 puntos en envoltente acústica ADSR. La imagen describe la envoltente acústica de dos entidades sónicas, las cuales mezclaron su información "genética" para crear otra entidad con componentes de la envoltente acústica de sus progenitores. Se puede observar que la entidad sónica hija tiene el ataque de la entidad sónica 1, además tiene el decaimiento y relajación de la entidad sónica 2. Por último, el sostenimiento es un parámetro, el cual es el mismo en las dos entidades sónicas progenitoras

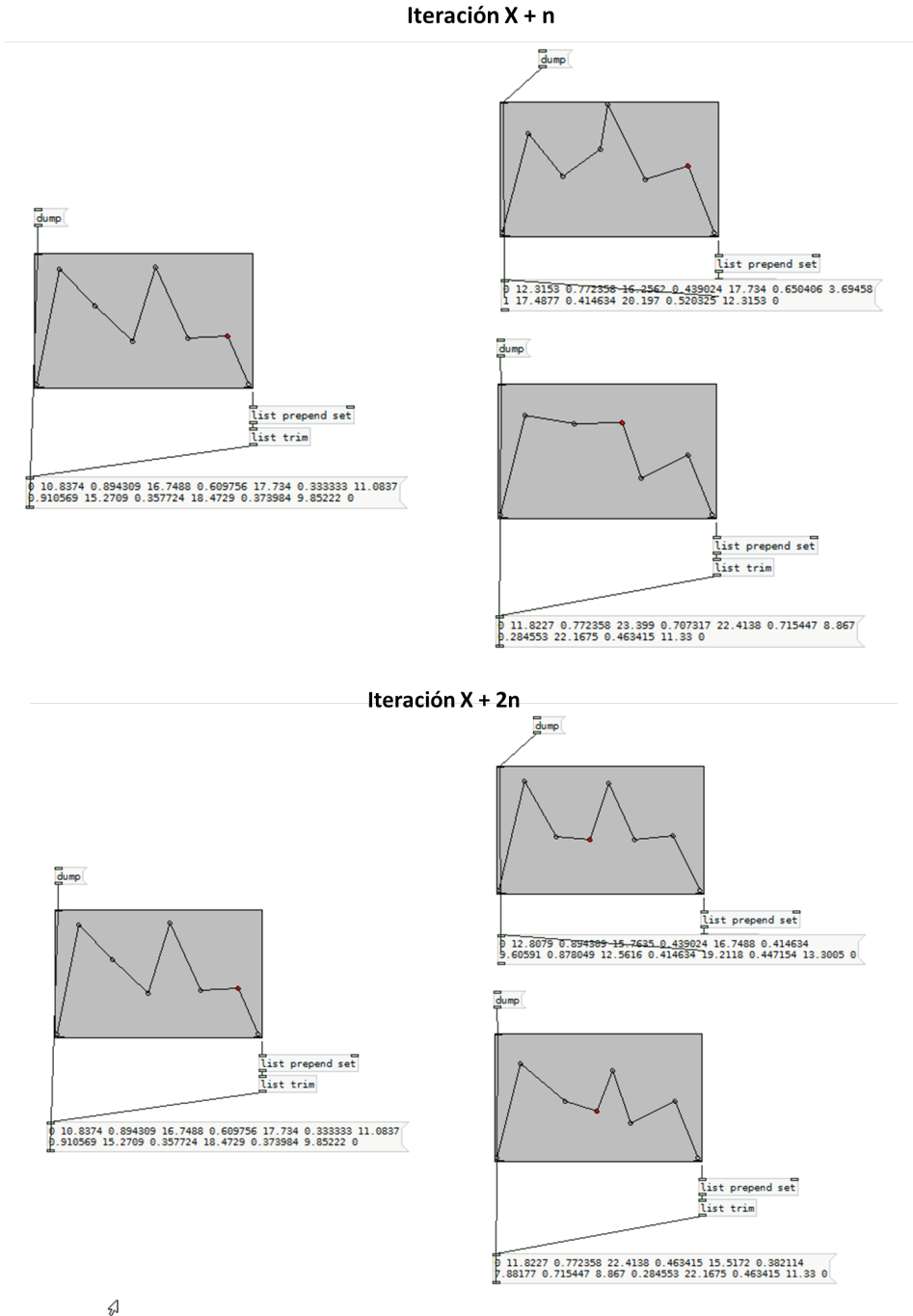


**Figura 2.23:** Envolventes acústicas: la parte izquierda ilustra la envolvente acústica dada por el director y su representación numérica en un vector o arreglo de números. En la parte derecha se ilustra la envolvente acústica de dos entidades sónicas



**Figura 2.24:** Caminata aleatoria en la envolvente acústica. Acá se ilustra cómo en x repeticiones del proceso (iteraciones), las dos entidades sónicas por medio de pasos discretos se van aproximando a la forma de envolvente acústica establecida por el director.

## 2. PROCESO COMPOSITIVO, PARÁMETROS TÉCNICOS Y ESTRUCTURALES DEL SISTEMA *SIMBIOSIS*



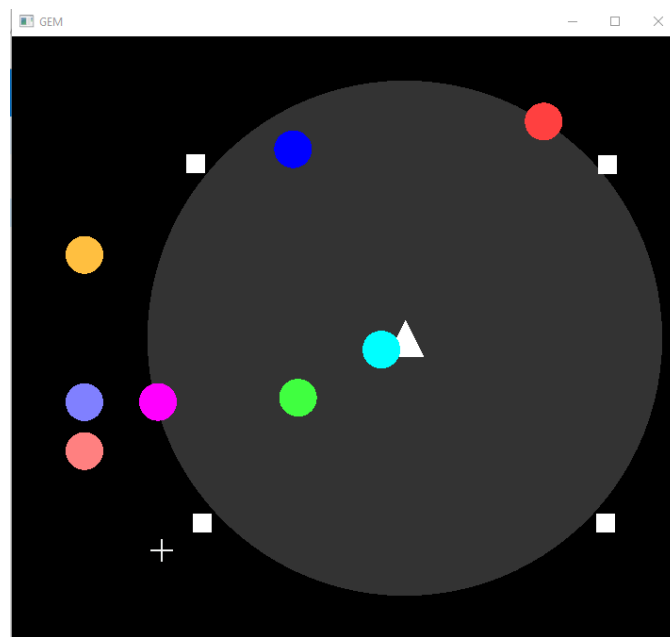
**Figura 2.25:** Finalmente, después de muchas iteraciones o repeticiones del proceso de caminata aleatoria, las envolventes acústicas se va aproximando a la forma establecida por el director.



### 2.3.6. Espacio virtual - módulo biotopo y efectos

Biotopo<sup>1</sup> describe un espacio con determinadas condiciones ambientales donde conviven un conjunto de seres vivos (Hoshino, 2003). En este caso el biotopo corresponde al espacio virtual modelado en un sistema cuadrafónico por medio de la simulación aparente de ambientes virtuales y el ambiente corresponde a los efectos de sonido distribuidos por el director en el espacio virtual.

Para este proyecto se hizo uso de unos patches programados por el maestro Luis Fernando Sanchez Gooding en cual tiene un funcionamiento híbrido, es decir; define comportamiento y fenotipo para las entidades sónicas, este patch determina el recorrido en un espacio virtual por medio de la simulación de espacio para la fuente sonora. El recorrido de cada entidad sónica es único y se particulariza al momento de nacer, pero se recorre por medio de caminatas aleatorias, siendo esto una metáfora en donde las entidades sónicas tienen un camino definido al momento de nacer pero ellas escogen cómo recorrerlo (Sánchez, 2017a).



**Figura 2.26:** Espacio virtual - biotopo. Desarrollado en GEM<sup>11</sup> en donde los cuadrados representan los altavoces, los círculos las entidades sónicas y el triángulo el auditorio. Imagen extraída del patch de Luis Fernando Sánchez Gooding.

<sup>1</sup>Del griego βίος bios, "vida" y τόπος topos, "lugar"

<sup>11</sup>GEM es un entorno gráfico para multimedia. Fue escrito originalmente por Mark Danks para generar en tiempo real de gráficos por ordenador, especialmente para composiciones audiovisuales, actualmente esta integrado como librería en pure data (Data, 2017).

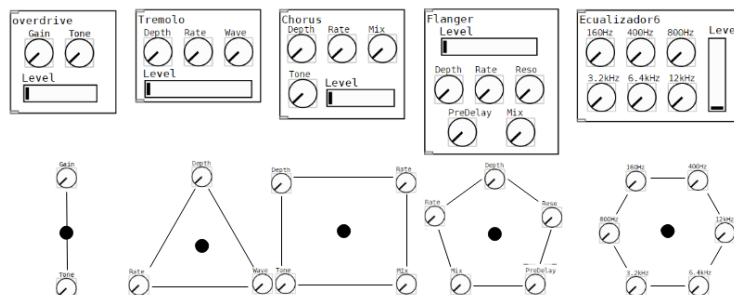
## 2. PROCESO COMPOSITIVO, PARÁMETROS TÉCNICOS Y ESTRUCTURALES DEL SISTEMA *SIMBIOSIS*

*Simbiosis* cuenta con una variedad procesadores de efectos, los cuales mezclan la señal procesada (señal "húmeda") con parte de la señal sin procesar (señal "seca"), estos efectos alteran diversas características del sonido, ya sea el contenido espectral, la frecuencia o la envolvente. Se suelen dividir en 2 clases: efectos en serie y efectos en paralelo, los primeros procesan la totalidad de la señal y los segundos corresponden a los procesadores de efectos. La siguiente tabla ilustra una clasificación de los efectos en serie y en paralelo mas conocidos:<sup>1</sup>

**Tabla 2.3:** Efectos en serie y paralelo

Efectos en Serie	Efectos en Paralelo. <sup>11</sup>
Ecuilizador de bandas	Retardo (delay)
Ecuilizador Paramétrico	Reflexiones tempranas
Compresor	Reverberación
Compuerta	Ambiencia
Expansor	Coro (chorus)
Limitador	Flanger
Vibrato	Phaser
Wha-Wha	Trémolo
	Distorsion
	Resaltadores (Enchancers)
	Exitadores (exciters)
	Desplazador de Altura

Puesto que cada procesador de efectos tiene un numero diferente de parámetros, se le ha relacionado una figura geométrica a cada procesador de efectos, en donde el numero de parámetros corresponde al numero de vértices. La figura 2.27 ilustra lo anterior

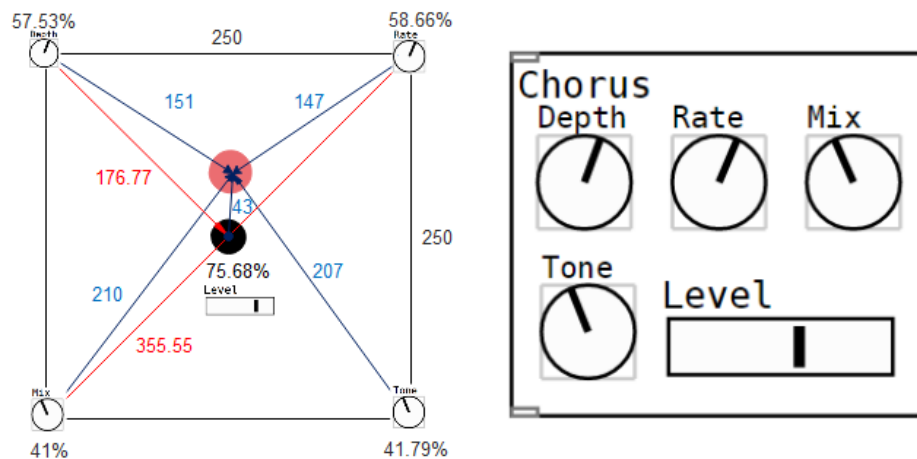


**Figura 2.27:** Abstracción geométrica de los efectos. Cada vértice representa un parámetro del efecto, el volumen o *level* del efecto siempre estará ubicado al centro de la figura geométrica

Supongamos el efecto es un *Chorus* como el ilustrado en la figura 2.28; este efecto tiene 4 parámetros y el *level*, por lo tanto su representación es un cuadrado. El director

<sup>1</sup>Si ud desea indagar acerca de los fundamentos teóricos y la programación de procesadores de efectos puede consultar Browning (1997), Zölzer y Smith Iii (2003) o Miyara (2003)

le asigna un área de afectación en este caso 62.500 unidades (ya que cada lado mide 250 unidades), posteriormente ubica el efecto en el espacio virtual y la entidad sónica pasa por este efecto.



**Figura 2.28:** Detalle del funcionamiento de un efecto. Cada vértice representa un parámetro del procesador de efectos *Chorus*, el punto negro el *level* y el punto rosado la entidad sónica

Para entender el funcionamiento de un procesador de efectos en *Simbiosis* tomemos como ejemplo nuevamente la figura 2.28, en donde la entidad sónica en determinado instante se encuentra ubicada dentro del área de afectación del efecto. La forma de calcular el valor que debe tener cada parámetro es el siguiente:

1. Se calcula la distancia de la entidad sónica con respecto a cada parámetro, en este caso por medio del teorema de Pitágoras.
2. Se calcula la distancia máxima de alejamiento entre la entidad sónica y x parámetro (en este caso corresponde a la diagonal del cuadrado).
3. Se realiza una regla de tres inversa entre los dos anteriores para obtener un porcentaje sobre 100. Este porcentaje corresponde al valor que debe tomar cada parámetro en el instante en el cual la entidad sónica esta ubicada en x posición.

De igual forma con el *level*, se realiza la regla de tres pero con la mitad de la diagonal del cuadrado.

## 2.4. Interfaz de usuario instrumentista

Live-coding practice accentuates the score, and whilst it is the perfect vehicle for the performance of algorithmic music it also transforms the process itself into a live event. As a continuation of 20th-century artistic developments of the musical score, live-coding systems often embrace graphical elements and language syntaxes foreign to standard programming languages.<sup>1</sup> (Magnusson, 2011)

- Thor Magnusson -

El intérprete en *Simbiosis* es un agente o entidad más en el sistema, la información de lo que debe interpretar proviene de la central de datos (*Pure Data*), y tienen los mismos procesos de búsqueda por medio de cadenas de Márkov en cuanto al recorrido armónico y melódico, solo que esta información es traducida en notación convencional (partitura) para que el interprete humano pueda ejecutarla en su instrumento. Para tal fin, se hizo uso de la librería *Gemnotes* del Dr. Edward Kelly el cual es un sistema de notación musical en tiempo real que usa fuentes *TrueType* (RSA), se ejecuta en el entorno gráfico para Multimedia (GEM) dentro del lenguaje de *Pure Data* (PD). El sistema hace uso de la creación de objetos dinámicos en la PD para crear subpatches vinculados a un objeto Kelly (2011).

En la figura 2.30 se ilustra la interfaz de usuario para el intérprete en funcionamiento. En la parte central y superior se ilustra la pua o plectro que debe usar el intérprete (metal, plástico y madera). En la parte superior izquierda se detalla información con respecto al parámetro temporal; puesto que no existe un pulso como tal en la obra ya que el parámetro temporal en cada entidad se desarrolla de forma independiente, sería ineficaz asignar duraciones exactas a cada nota y sería complicado de resolver en tiempo real para el intérprete humano, es por esto que simplemente se le indican parámetros generales al intérprete tales como duraciones cortas, largas, ad libitum, regulares, irregulares etc., y de esta manera el intérprete improvisa patrones rítmicos sobre el material tónico que le es mostrado en el pentagrama.

---

<sup>1</sup>La práctica de codificación en vivo acentúa la partitura y, si bien es el vehículo perfecto para el performance de la música algorítmica, también transforma el proceso en un evento en vivo. Como una continuación de los desarrollos artísticos de la partitura musical del siglo XX, los sistemas de codificación en vivo a menudo incluyen elementos gráficos y sintaxis de lenguaje ajenas a los lenguajes de programación estándar.-Traducción propia-



**Figura 2.29:** Interfaz de usuario para el intérprete humano.

Por otro lado, las articulaciones, técnicas y dinámicas también están modeladas por medio de cadenas de Márkov las cuales el director puede restringir a su gusto en tiempo real como lo hace con los parámetros armónico, melódico y rítmico de las entidades. Para este caso en el cual la versión es para bandola andina colombiana, se realizó un estudio de las diferentes técnicas y se agruparon de la siguiente forma para crear las cadenas de Márkov:

1. Técnicas en texto: Met: Metálico, Sul Tasto, Sordina, Med Sordina, Armónicos Artificiales, Campanella.
2. Articulaciones: Las articulaciones posibles son: Acento, acento-staccato, acento-tenuto, pizzicato bartok, marcato-staccato, tenuto-staccato, zumbido, staccato, tremolo regular, tremolo libre y vibrato.
3. Dinámicas: todas las opciones desde fff a ppp con sus respectivos reguladores de crescendo a decrescendo

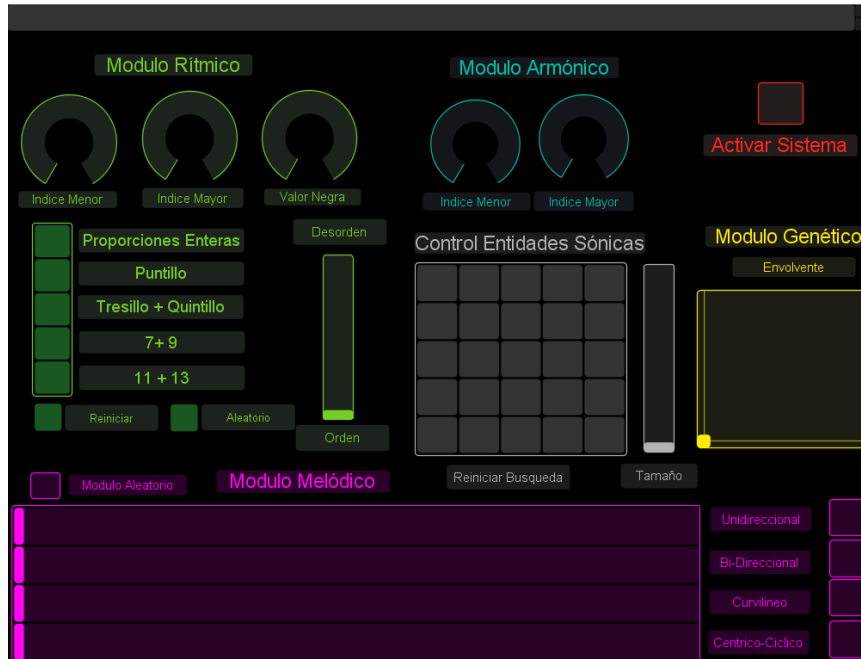
Adicional a esto, se elaboró una partitura en físico para la ocasión en la cual no existan los recursos físicos y tecnológicos que se describieron anteriormente, dicha partitura esta dispuesta y explicada en el anexo A, para este caso el intérprete tendrá un rol un tanto más propositivo.

## 2.5. Dispositivos de control

*Con todo aquello en desorden, el dios insertó proporciones en cada cosa respecto de sí y respecto de los demás, esas simetrías eran tan abundantes como fue posible y se encontraban en las cosas ajustadas según proporción y medida común[...] todas esas partes primero fueron ordenadas y luego se constituyo con ellas ese todo, viviente único que contiene en sí misma todos los vivientes mortales e inmortales.*

-Platón -

Los módulos anteriormente descritos se ha diseñado e implementado en TouchOSC, el cual es un software que permite enviar y recibir mensajes *Open Sound Control*<sup>1</sup> a *Pure Data*. La plantilla que se muestra a continuación es la que usa el director para controlar los módulos descritos anteriormente. Para la asignación de los efectos en el espacio virtual tiene que hacerse directamente en *Pure Data*, así como también parámetros de inicialización del sistema.



**Figura 2.30:** Interfaz de usuario para el intérprete humano. El color verde corresponde a todos los parámetros que controlan el módulo rítmico, en color azul los que controlan el módulo armónico, en el control XY sirve para dibujar la forma de envolvente acústica para el fitness.

---

<sup>1</sup>Open Sound Control es un protocolo de comunicaciones el cual permite comunicar instrumentos de musica, computadoras y dispositivos móviles

## Conclusiones

---

Much of what happens in the universe results from recombination. The recombination of atoms, for instance, produces new molecules. Complex chemicals derive from the recombination of more rudimentary particles. Humans evolve through genetic recombination and depend on recombination for communication, since language itself results from the recombining of words and phrases. Cultures thereby rely on recombination to establish and preserve their traditions. Music is no different. The recombinations of pitches and durations represent the basic building blocks of music. Recombination of larger groupings of pitches and durations, I believe, form the basis for musical composition and help establish the essence of both personal and cultural musical styles. As will be seen, recombination also plays a significant role in my Experiments in Musical Intelligence program.

- Cope (2004) -

### **Implicaciones de la creatividad artificial**

Este tipo de investigaciones suelen suscitar preguntas tales como: ¿la máquina puede ser realmente creativa?, ¿es posible superar la prueba de Turing con este tipo de sistemas informáticos en música?, ¿cuál es la relación entre creatividad y computación? y las que se plantea Raymond Kurzweil<sup>1</sup> ¿quién es el artista: el compositor siendo emulado, el software, o el compositor frente a sí mismo?, responder estas preguntas puede ser un poco pretencioso. Si bien ya existen sistemas computacionales capaces de imitar el estilo de diversos compositores, considero que el potencial de las máquinas, la IA y los sistemas computacionales no radica en qué tanto puede imitar el estilo de determinado compositor, qué tanto se parece a un ser humano, si pueden pensar, sentir.

---

<sup>1</sup>Inventor y autor de los libros La era de las máquinas espirituales (Kurzweil, 2000) y La era de las máquinas inteligentes (Kurzweil y cols., 1990)

Precisamente, el potencial de las máquinas y de la inteligencia artificial radica en sus cualidades únicas que la diferencian del ser humano, una de las cuales es que son capaces de procesar grandes volúmenes de datos en un tiempo corto, algo que para el ser humano es una tarea complicada. Sin embargo, hasta ahora la inteligencia artificial no tiene la capacidad de un juicio u orientación estética. Es por esto que una relación entre el ser humano y la máquina desde una perspectiva simbiótica, en donde el ser humano actúa como un sistema experto con juicio estético y la IA actúa como una entidad capaz de procesar grandes volúmenes de datos. Dicha relación simbiótica permite y hace posible nuevos paradigmas para comprender, concebir y percibir el sonido, lo cual nos permite llevarnos a situaciones creativas sustancialmente innovadoras, siendo fundamental el caos, el indeterminismo y la aleatoriedad.

En el ensayo *estética de lo posible: vidas que emergen y vidas pre existentes* (2010), de Iliana Hernández García, se plantea la siguiente pregunta ¿qué es una biología de lo posible cuyo centro de interés es la vida artificial y qué relaciones se podrían pensar desde la estética? a lo cual Iliana responde que: “la biología de lo posible no esta centrada en la vida a base de carbono, sino en la vida a través de silicio o cualquier otro soporte, forma o contenido que exhiba un proceso o sistema de organización o reproducción autónomo”. Es por esto que la reflexión en torno a la creatividad artificial y la estética se enfoca sobre la posibilidad, la posibilidad de lo virtual y de las creaciones electrónicas, las construcciones matemáticas basadas o inspiradas en procesos y modelos propios de la vida basada en carbono.

Hernández propone la siguiente tesis: “La biología de lo posible es la biología virtual y la estética contemporánea es la estética de la vida artificial”, argumentando que si la estética es lo admirable de la potencia creadora de la acción y el pensamiento, las formas de vida posible, en este caso las basadas en silicio, son un punto de partida que deben registrar la estética como producción de lo sensible. Otro argumento que plantea Hernández, es que: “la estética libera, haciendo emerger la posibilidad - de lo nuevo-, y esto ocurre cuando suceden rupturas en las concepciones valores de lo conocido o establecido”

## Modelos Bio-inspirados

Se le suele atribuir a Albert Einsten la siguiente frase: “*Mira profundamente dentro de la naturaleza, y entonces comprenderás todo mejor*”, sea de su autoría o no, el estudio de las leyes físicas, la biología, la química y en sí el estudio de la naturaleza y el posterior modelado en sistemas computacionales permite concebir nuevas perspectivas de componer y crear música. La estética de lo posible o la bio-estética planteada por Hernández afirma que la indagación o estudio de todas estas leyes pueden generar rupturas creativas que



el mismo concepto no propone, por ejemplo el mapa del ADN, el comportamiento de los animales o el funcionamiento de un ecosistema. Todo lo anterior no sugiere ni propone algo creativo, más sin embargo por medio de exploraciones semánticas, se pueden generar otros caminos en los cuales se representa el pensamiento crítico y la potencia creadora, esto es evidente en mucho del trabajo del compositor Eduardo Reck Miranda y de los trabajos publicados en EvoMUSART.

## Aplicaciones de las Matemáticas en Música

El uso de las matemáticas y la aplicación de sistemas no lineales en la creación musical, por medio de sistemas estocásticos, técnicas de control y optimización no lineal, no solo permiten entender y analizar las propiedades del sonido y de la música, sino que también hace posible el desarrollo de nuevos paradigmas estéticos en la creación artístico-musical, en donde la IA juega un papel importante proponiendo ideas de carácter creativo novedosas e imprevistas. Como bien lo afirma José Lopez-Montes en su trabajo *GenoMus: prospección de técnicas de creatividad asistida por computadora mediante la metaprogramación de genotipos musicales*, el diseñar algoritmos para generar música contiene decisiones de carácter compositivo, y si bien al programar no se compone música, los algoritmos son como el lienzo o la herramienta que constituye parámetros que harán posible la creación musical. Es preciso citar a Ortega y Gasset, quien siendo consciente de que la temporalidad del hombre es consustancial a su persona afirmó *somos hijos de nuestro tiempo*. Por lo tanto, si bien en el pasado la partitura fue la herramienta compositiva por excelencia, hoy es preciso integrar la programación como herramienta meta-compositiva, la programación es la versión actual de lo que en otros tiempos se pensaba como luthería.

## Ideas para futuras investigaciones y/o creaciones

A continuación se presenta un marco de ideas para futuras investigaciones o creaciones, ya que *Simbiosis* se plantea como un sistema en continuo desarrollo, actualización y modificación, no se plantea como una obra totalmente culminada, sino como un sistema a mejorar.

1. **Comportamientos etológicos:** la etología es la rama de la biología que se encarga de estudiar el comportamiento de los animales en sus medios naturales. Uno de los intereses del presente proyecto es programar poblaciones de entidades sónicas diferenciadas por especies a las cuales se les asignaba un comportamiento animal. Como por ejemplo la formación de castas, la jerarquía y división del trabajo en los

insectos, o también, la comunicación y el lenguaje entre especies, o la depredación. Todos estos comportamientos extraídos de la naturaleza son aplicados en lo que hoy se denominan ecosistemas sonoros y es a lo que le apunta el sistema *Simbiosis* para futuras creaciones o versiones.

2. **Síntesis de modelado físico y diversos formatos instrumentales:** para la primera versión de *Simbiosis* la cual se realizó con bandola andina colombiana, se hizo uso del algoritmo Karplus-Strong, puesto que guarda relación o simula el sonido de una cuerda pulsada. Para posteriores versiones se pretende explorar con instrumentos de distintas familias y de igual manera con la síntesis de modelado físico que guarde relación con el instrumento.
3. **Escalas y bases de datos:** otra vía para la exploración de futuras creaciones es la alimentación del sistema *Simbiosis* con diversas bases de datos, ya sean de escalas, patrones rítmicos, estudio técnico de diversos instrumentos o estructuras armónicas propias de diversos estilos o géneros musicales, no con el fin de imitarlos, sino de ampliar y descubrir nuevas posibilidades de creación musical.

## Bibliografía

---

- Adamatzky, A., y Komosinski, M. (2005). *Artificial life models in software*. Springer.
- Advanced Design Studies, T. U. o. T. (2017). *Python intro 02 function – random walk*.  
Descargado de <http://cu.t-ads.org/?p=406>
- Albus, J. (1995, Feb). in response to henry hexmoor.
- Alfonseca, M., Cebrián, M., y Ortega, A. (2007). A simple genetic algorithm for music generation by means of algorithmic information theory. En *2007 ieee congress on evolutionary computation* (pp. 3035–3042).
- Alimena, D., y El-Homsi, A. (2015). *Harmonization: A new way of seeing, being, and doing*. AuthorHouse.
- Allan, M., y Williams, C. K. (2005). Harmonising chorales by probabilistic inference. *Advances in neural information processing systems*, 17, 25–32.
- Amiot, E. (2007). David lewin and maximally even sets. *Journal of Mathematics and Music*, 1(3), 157–172.
- Asimov, I. (1984). *Asimov's new guide to science*. New York: Basic Books.
- Asmussen, S. (2008). *Applied probability and queues* (Vol. 51). Springer Science & Business Media.
- Balakrishnan, R., y Ranganathan, K. (2012). *A textbook of graph theory*. Springer Science & Business Media.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- Barbu, V. S., y Limnios, N. (2009). *Semi-markov chains and hidden semi-markov models toward applications: their use in reliability and dna analysis* (Vol. 191). Springer Science & Business Media.
- Basharin, G. P., Langville, A. N., y Naumov, V. A. (s.f.). *The life and work of a. a. markov*.
- Bellinger, E. (s.f.). Little ludwig, an evolutionary learning machine for musical composition.
- Bellman, R. (1978). *An introduction to artificial intelligence: Can computers think?* Boyd & Fraser.
- Bernal, M. (s.f.). La bandola andina colombiana, reseña histórica, características y bases técnicas de ejecución. *10mo Ciclo La mandolina a travez del tiempo Internacional*.
- Bernal, M. (2003). Cuerdas más, cuerdas menos: una visión del desarrollo morfológico de la bandola andina colombiana. *Monografía. Universidad Pedagógica Nacional, Bogotá, Colombia*.
- Biggs, N. (1993). *Algebraic graph theory*. Cambridge university press.
- Biles, J. A. (1994). Genjam: A genetic algorithm for generating jazz solos. in proceedings. *International Computer Music Conference*.
- Bondy, J. A., y Murty, U. S. R. (1976). *Graph theory with applications* (Vol. 290). Citeseer.
- Bourlard, H. A., y Morgan, N. (2012). *Connectionist speech recognition: a hybrid approach* (Vol. 247). Springer Science & Business Media.
- Brautigan, R. (1967). *All watched over by machines of loving grace*. Communication Company.
- Bregman, A. (1990). *Auditory scene analysis: The perceptual organization of sound. 1990*. MIT Press, Cambridge, MA.

- Bregman, A. S. (1994). *Auditory scene analysis: The perceptual organization of sound*. MIT press.
- Browning, P. L. (1997). *Audio digital signal processing in real time* (Tesis Doctoral no publicada). West Virginia University.
- Buchler, M. (2000). Broken and unbroken interval cycles and their use in determining pitch-class set resemblance. *Perspectives of New Music*, 52–87.
- Cádiz, R. (2008). Propuestas metodológicas para el análisis de música electroacústica.
- Callender, C. (2007). Continuous harmonic spaces. *Journal of Music Theory*, 51(2), 277–332.
- Carpentier, G., y Bresson, J. (2010). Interacting with symbol, sound, and feature spaces in orchidée, a computer-aided orchestration environment. *Computer Music Journal*, 34(1), 10–27.
- Castañeda, A. A. E. (2016). *Máquinas sonoras: Aplicaciones de las ciencias de la complejidad a la creación musical y sonora* (Tesis Doctoral no publicada). Universidad Autónoma de México, Facultad de Música.
- Chai, W., y Vercoe, B. (2001). Folk music classification using hidden markov models. En *Proceedings of international conference on artificial intelligence* (Vol. 6).
- Childs, E. (2002). Achorripsis: A sonification of probability distributions.
- Ching, W. K., y Ng, M. K. (2006). *Markov chains*. Springer.
- Chowning, J. M. (1971). The simulation of moving sound sources. *Journal of the Audio Engineering Society*, 19(1), 2–6.
- Chrissochoidis, I., Mitsakis, C., y Houliaras, S. (2005). Set theory in xenakis' eonta. , 241–249.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- Cohn, R. (1991). Properties and generability of transpositionally invariant sets. *Journal of Music Theory*, 35(1/2), 1–32.
- Cope, D. (2004). *Virtual music: computer synthesis of musical style*. MIT press.
- Cortés, J., y Bernal, M. (1998). La bandola andina colombiana en las paradojas de la música popular y la identidad nacional. En *Actas del iv congreso latinoamericano de la asociación internacional para el estudio de la música popular*. consultado de la página web: <http://www.hist.puc.cl/historia/iaspmla.html>.
- Creston, P. (1964). *Principles of rhythm*. F. Columbo.
- Cáceres, J. P. (2007). Introducción al modelamiento físico karplus strong y otras cuerdas. *CCRMA*.
- Dahlstedt, P. (2007). Autonomous evolution of complete piano pieces and performances.
- Darwin, C. (1888). *The descent of man, and selection in relation to sex* (Vol. 1). Murray.
- Data, P. (2017). *What is gemj*. Descargado de <http://gem.iem.at/documentation/faq/what-is-gem> (accedido: 23-marzo-2017)
- Davismoon, S., y Eccles, J. (2010). Combining musical constraints with markov transition probabilities to improve the generation of creative musical structures. *Applications of Evolutionary Computation*, 361–370.
- Dawkins, R. (1986). *The blind watchmaker* (Longman, Ed.).
- De Jong, K., Fogel, D., y Schwefel, H.-P. (1997). Handbook of evolutionary computation. *IOP Publishing Ltd and Oxford University Press*.
- del Grazia, N. (2016). *Clarinet multiphonics*.
- Diestel, R., Král, D., y Seymour, P. (2016). Graph theory. *Oberwolfach Reports*, 13(1), 51–86.

- Dodge, C., y Jerse, T. A. (1997). *Computer music: synthesis, composition and performance*. Macmillan Library Reference.
- Donnelly, P., y Sheppard, J. (2011). Evolving four-part harmony using genetic algorithms. En *European conference on the applications of evolutionary computation* (pp. 273–282).
- Dunn, F., Hartmann, W., Campbell, D., Fletcher, N., y Rossing, T. (2015). *Springer handbook of acoustics*. Springer.
- Eiriz, C. (2012). Una guía comentada acerca de la tipología y la morfología de pierre schaeffer. *Cuadernos del Centro de Estudios en Diseño y Comunicación. Ensayos*(39), 39–56.
- Fatmi, H. A., y Young, R. W. (1970). A definition of intelligence. *Nature*, 228, 91.
- Fernández, J. D., y Vico, F. (2013). Ai methods in algorithmic composition: A comprehensive survey. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 48, 513–582.
- Feulner, J., y Hörnel, D. (1994). Melonet: Neural networks that learn harmony-based melodic variations. En *Proceedings of the international computer music conference* (pp. 121–121).
- Fodor, J. (1983). *The modularity of mind*. MIT Press. Descargado de <https://books.google.com.co/books?id=0vg0AwAAQBAJ>
- Fogel, L. J., Angeline, P. J., y Fogel, D. B. (1995). Approach to self-adaptation on finite state machines. En *Evolutionary programming iv: Proceedings of the fourth annual conference on evolutionary programming* (Vol. 355).
- Forte, A. (1973). *The structure of atonal music* (Vol. 304). Yale University Press.
- Franco, L. F. (2005). *Músicas andina occidental, entre pasillos y bambucos*. Ministerio de Cultura. República de Colombia.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- Gardner, M. (1970, October). Mathematical games – the fantastic combinations of john conway's new solitaire game life. *Scientific American*, 223, pp. 120–123. Descargado de [http://ddi.cs.uni-potsdam.de/HyFISCH/Produzieren/lis\\_projekt/proj\\_gamelifelife/ConwayScientificAmerican.html](http://ddi.cs.uni-potsdam.de/HyFISCH/Produzieren/lis_projekt/proj_gamelifelife/ConwayScientificAmerican.html)
- Ginés, C. L., de Arenosa Barbeito, P. L., y Rodríguez, J. Z. (2013). Mytone: compositor musical con algoritmos genéticos.
- Gray, R. M., y cols. (2006). Toeplitz and circulant matrices: A review. *Foundations and Trends® in Communications and Information Theory*, 2(3), 155–239.
- Grisey, G. (1987). *Tempus ex machina*. G. Ricordi Bühnen-und Musikverlag.
- Haeckel, E. H. P. A., i Miquel, S. S., y Sentiñón, G. (1887). *Morfología general de los organismos*. Blas Carrera.
- Hall, R. W., Tymoczko, D., y cols. (2007). Poverty and polyphony: A connection between economics and music. *Bridges: Mathematical Connections in Art, Music, and Science*, Donostia, Spain.
- Hanson, H. (1960). *Harmonic materials of modern music: Resources of the tempered scale*. Irvington Pub.
- HERNÁNDEZ, I. (2010). Estética de lo posible: vidas que emergen y vidas preexistentes. *HERNANDEZ, Iliana; NIÑO, Raúl (ed. académicos). Estética, vida artificial y biopolítica: expansiones en la evolución cultural y biológica a través de la tecnología*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Hildebrand, F. B. (1987). *Introduction to numerical analysis*. Courier Corporation.
- Hofstadter, D. (2007). *Gödel, escher, bach: un eterno y grácil bucle*. Tusquets. Descargado de <https://books.google.com.co/books?id=qa30IAAACAAJ>
- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. U Michigan Press.



- Holland, J. H. (1992). Genetic algorithms. *Scientific american*, 267(1), 66–72.
- Horner, A., y Goldberg, D. E. (1991). Genetic algorithms and computer-assisted music composition. *Urbana*, 51(61801), 437–441.
- Hoshino, T. (2003). *Fundamental research in natural management of large biotope aiming for regeneration of nature: Introduction*.
- Hughes, B. D. (1995). *Random walks and random environments: Volume 1: Random walks* (Vol. volume 1). Oxford University Press, USA. Descargado de <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=38F16396A2D1216C6F3634780B569A6F>
- Isaacson, D. L., y Madsen, R. W. (1976). *Markov chains, theory and applications* (Vol. 4). Wiley New York.
- Isaacson, E. J. (1990). Similarity of interval-class content between pitch-class sets: the icvsim relation. *Journal of music theory*, 1–28.
- İzmirli, Ö. (2015). Constructing geometrical spaces from acoustical representations. En *Mathematics and computation in music* (pp. 245–256).
- Jackson, P. (1985). *Introduction to artificial intelligence*. Dover. Descargado de [https://books.google.com.co/books?id=0AL5jE\\_Q5wQC](https://books.google.com.co/books?id=0AL5jE_Q5wQC)
- Jensen, J. H. (2011). Evolutionary music composition: A quantitative approach.
- Karplus, K., y Strong, A. (1983). Digital synthesis of plucked-string and drum timbres. *Computer Music Journal*, 7(2), 43–55.
- Karpov, I., y Subramanian, D. (2002). Hidden markov classification for musical genres. *Course Project*.
- Katok, A., y Hasselblatt, B. (1997). *Introduction to the modern theory of dynamical systems* (Vol. 54). Cambridge university press.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- Kelly, E. (2011). Gemnotes: a realtime music notation system for pure data. En *Proceedings of iv international conference of pure data-weimar*.
- Kojs, J., Serafin, S., y Chafe, C. (2007). Cyberinstruments via physical modeling synthesis: Compositional applications. *Leonardo Music Journal*, 17, 61–66.
- Kolman, B., Busby, R. C., y Ross, S. (1997). *Estructuras de matemáticas discretas para la computación*. Pearson Educación.
- Kolman, B., y Hill, D. R. (2006). *Álgebra lineal*. Pearson Educación.
- Koski, T. (2001). *Hidden markov models for bioinformatics* (Vol. 2). Springer Science & Business Media.
- Koza, J. R. (1992). *Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection* (Vol. 1). MIT press.
- Kurzweil, R. (2000). *The age of spiritual machines: When computers exceed human intelligence*. Penguin Publishing Group. Descargado de <https://books.google.com.co/books?id=1b14MN3iUHsC>
- Kurzweil, R., Richter, R., Kurzweil, R., y Schneider, M. L. (1990). *The age of intelligent machines* (Vol. 579). MIT press Cambridge.
- Lamarck, J.-B. (1847). *Philosophie zoologique (paris, 1809)* (Inf. Téc.).
- Larson, R. E. H., Robert, P., Edwards, B. H., Abellanas Rapún, L., y cols. (1999). *Cálculo y geometría analítica*.
- Lehmann, D., y Ram, G. (s.f.). Netneg: A hybrid interactive architecture for composing polyphonic music in real time.
- Lewin, D. (1959). Re: Intervallic relations between two collections of notes. *Journal of Music Theory*, 3(2), 298–301.

- Loy, G., y Abbott, C. (1985). Programming languages for computer music synthesis, performance, and composition. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 17(2), 235–265.
- López-Montes, J. (2013). *Genomus. prospección de técnicas de creatividad asistida por computadora mediante la metaprogramación de genotipos musicales* (Tesis de Master no publicada). Universidad Rey Juan Carlos. Facultad de Ciencias del Turismo, Departamento de Ciencias de la Educación, el Lenguaje, la Cultura y las Artes.
- Magnusson, T. (2011). Algorithms as scores: Coding live music. *Leonardo Music Journal*, 21, 19–23.
- Marvin, E. W., y Laprade, P. A. (1987). Relating musical contours: Extensions of a theory for contour. *Journal of Music Theory*, 31(2), 225–267.
- McCormack, J. (2001, August). Advances in artificial life. En F. of Philosophy y S. U. Science Institute of Computer Science (Eds.), (Vol. 2159, p. 133-142). Springer Berlin Heidelberg.
- McDermott, J. R. J., y Correia, J. (2013). *Evolutionary and biologically inspired music, sound, art and design*. Springer.
- Mendel, G. (1996). Experiments in plant hybridization (1865). *Verhandlungen des naturforschenden Vereins Brünn.*) Available online: [www.mendelweb.org/Mendel.html](http://www.mendelweb.org/Mendel.html) (accessed on 1 January 2013).
- Mendoza, V. H. (2014). *Síntesis de sonido digital por modelos físicos de cuerda percutida, frotada y preparada, y su aplicación en la composición musical* (Tesis Doctoral no publicada). Escuela Superior de Música.
- Minghini, y Miyara. (2009). Síntesis de sonido por modelado físico de instrumentos de cuerda percutida. *Mecánica Computacional*, XXVIII, 101-111.
- Minsky, M. (1965). Matter, mind and models. En *Ifip congress* (pp. 45–50). Spartan Books. Descargado de <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/6119>

## BIBLIOGRAFÍA

---

- Miranda, E. (2001). *Composing music with computers*. CRC Press.
- Miranda, E. R. (2001). Evolving cellular automata music: From sound synthesis to composition. *Sony Computer Science Laboratory Paris*, 223. Descargado de <http://cs1.sony.fr/downloads/papers/2001/miranda-almma2001.pdf>
- Miranda, E. R. (2013). *Readings in music and artificial intelligence* (Routledge, Ed.).
- Miranda, E. R., y Al Biles, J. (2007). *Evolutionary computer music*. Springer.
- Miyara, F. (2003). *Acústica y sistemas de sonido*. Universidad Nacional de Rosario.
- Monte, R. A. (1999). The random walk for dummies. *Mit Undergraduate Journal of Mathematics*, 1, 143–148.
- Moore, C. N. (2007). Random walks. *Ramanujan Math. Soc. Math. Newlett*, 17, 78–84.
- Morris, R. D. (1993). New directions in the theory and analysis of musical contour. *Music Theory Spectrum*, 15(2), 205–228.
- Nackaerts, A. (2003). Sound synthesis by simulation of physical models of musical instruments.
- Nierhaus, G. (2009). *Algorithmic composition: paradigms of automated music generation*. Springer Science & Business Media.
- Nilsson, N. J. (1998). *Artificial intelligence: A new synthesis* (Elsevier, Ed.). San Francisco, California.
- Oxford living dictionaries*. (2016, Noviembre). (<https://en.oxforddictionaries.com/definition/stochastic>)
- Papadopoulos, G., y Wiggins, G. (1998). A genetic algorithm for the generation of jazz melodies. *Proceedings of STEP*, 98.

- Papadopoulos, G., y Wiggins, G. (1999). Ai methods for algorithmic composition: A survey, a critical view and future prospects. En *Aisb symposium on musical creativity* (pp. 110–117).
- Penrose, R. (1999). *The emperor's new mind: Concerning computers, minds, and the laws of physics*. Oxford Paperbacks.
- Physics, I. O. (2017). *Practical physics*. Descargado de <http://practicalphysics.org/random-walk-experiment-2.html>
- Pope, S. T. (1993). *Music composition and editing by computer*. Oxford: Oxford University Press.
- Quinn, I. (2006). General equal-tempered harmony (introduction and part i). *Perspectives of New Music*, 114–158.
- Rabenstein, R., y Trautmann, L. (2001). Digital sound synthesis by physical modelling. En *Image and signal processing and analysis, 2001. ispa 2001. proceedings of the 2nd international symposium on* (pp. 12–23).
- Rabiner, L. R. (1989). A tutorial on hidden markov models and selected applications in speech recognition. *Proceedings of the IEEE*, 77(2), 257–286.
- Rae. (2016, November). Descargado de <http://dle.rae.es/?id=0KvTasd>
- Rahn, J. (1987). *Basic atonal theory*. MacMillan Publishing Company.
- Rechenberg, I. (1994). Evolution strategy. *Computational intelligence: Imitating life*, 1, 147–159.
- Révész, P. (2005). *Random walk in random and non-random environments*. World Scientific.
- Rich, E., y Knight, K. (1991). *Artificial intelligence*. McGraw-Hill.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- Roeder, J. (1987). A geometric representation of pitch-class series. *Perspectives of New Music*, 362–409.
- Ross, K. A., y Wright, C. R. (1992). *Discrete mathematics usa*. Prentice Hall.
- Rowe, R. (1992). *Interactive music systems: machine listening and composing*. MIT press.
- Roy, D. (2004, October). 10x - human-machine symbiosis. *BT Technology Journal*, 22(4), 4. Descargado de <http://dl.media.mit.edu/BT-10x.pdf>
- Schaeffer, P. (1988). *Tratado de los objetos musicales*. Alianza Editorial.
- Schifter, I. (2000). *La ciencia del caos*. SEP.
- Schillinger, J. (1948). The mathematical basis of the arts.
- Schulze, W. (2009). *A formal language theory approach to music generation* (Tesis Doctoral no publicada). University of Stellenbosch.
- Schwardt, L., y du Preez, J. A. (2000). Efficient mixed-order hidden markov model inference. En *Interspeech* (pp. 238–241).
- Scott, D., y Isaacson, E. J. (1998). The interval angle: A similarity measure for pitch-class sets. *Perspectives of New Music*, 107–142.
- Searle, J. (2007). *Freedom and neurobiology: Reflections on free will, language, and political power*. Columbia University Press. Descargado de <https://books.google.com.co/books?id=Jq2-vPMDmnQC>
- Sethares, W. A. (2005). *Tuning, timbre, spectrum, scale*. Springer Science & Business Media.
- Shafraonovich, Y. (2008). Common format and mime type for comma-separated values (csv) files.[sl], 2005. *Disponivel em:* <<http://www.ietf.org/rfc/rfc4180.txt>>.

- Sher, C. (1988). *The new real book: jazz classics, choice standards, pop-fusion classics: created by musicians, for musicians* (Vol. 1). Sher Music Co.
- Simon, I., Morris, D., y Basu, S. (2008). Mysong: automatic accompaniment generation for vocal melodies. En *Proceedings of the sigchi conference on human factors in computing systems* (pp. 725–734).
- Smalley, D. (1986). Spectro-morphology and structuring processes. En *The language of electroacoustic music* (pp. 61–93). Springer.
- Smalley, D. (1997). Spectromorphology: explaining sound-shapes. *Organised sound*, 2(02), 107–126.
- Smith, J. O. (2010). *Physical audio signal processing: For virtual musical instruments and audio effects*. W3K Publishing.
- Snyder, J. S., Gregg, M. K., Weintraub, D. M., y Alain, C. (2012). Attention, awareness, and the perception of auditory scenes. *Attention and consciousness in different senses*, 95.
- Solomos, M. (2011). Xenakis first compositor in musique concrète: Diamorphoses. En *Xenakis international symposium*.
- Spangler, R. R. (1999). *Rule-based analysis and generation of music* (Tesis Doctoral no publicada). Citeseer.
- Stockhausen, K. (2006). ... cómo transcurre el tiempo... *Traducción del inglés de pablo Di Liscia y Pablo Cetta. Universidad Católica Argentina, Centro de Estudios Electroacústicos*. (<http://www.eumus.edu.uy/eme>).
- Stone, K. (1980). *Music notation in the twentieth century: a practical guidebook*. WW Norton.
- Straus, J. N. (2003). Uniformity, balance, and smoothness in atonal voice leading. *Music Theory Spectrum*, 25(2), 305–352.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- Straus, J. N. (2016). *Introduction to post-tonal theory*. WW Norton & Company.
- Szeto, W. M., y Wong, M. H. (2006). A graph-theoretical approach for pattern matching in post-tonal music analysis. *Journal of New Music Research*, 35(4), 307–321.
- Sánchez, G. L. F. (2017a). *Del suspiro en el alba hasta el abrazo en el ocaso : una composición evolutiva*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Sánchez, G. L. F. (2017b). *Estrategias de organización*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Teitelbaum, R. (1965). Intervallic relations in atonal music. *Journal of Music Theory*, 9(1), 72–127.
- Tello, A. (2001). Antaras de celso garrido-lecca o la perenne persistencia de la peruanidad. *Revista musical chilena*, 55(196), 7–26.
- Thoresen, L., y Hedman, A. (2007). Spectromorphological analysis of sound objects: an adaptation of pierre schaeffer's typomorphology. *Organised Sound*, 12(02), 129–141.
- Trautmann, L., y Rabenstein, R. (2012). *Digital sound synthesis by physical modeling using the functional transformation method*. Springer Science & Business Media.
- Trek, S. (2016). *The Doctor*. Descargado de [http://www.startrek.com/database\\_article/the-doctor](http://www.startrek.com/database_article/the-doctor) (Online; accessed 02 September 2016)
- Turing, A. (1950). Computing machinery and intelligence. *Mind*, 59(236), 433-460.
- Turing, A. M. (1948). Intelligent machinery, a heretical theory. *The Turing Test: Verbal Behavior as the Hallmark of Intelligence*, 105.
- Tymoczko, D. (2006). The geometry of musical chords. *Science*, 313(5783), 72–74.
- Udvardy, M. F. (1959). Notes on the ecological concepts of habitat, biotope and niche. *Ecology*, 40(4), 725–728.



- Van Der Merwe, A., y Schulze, W. (2011). Music generation with markov models. *IEEE MultiMedia*, 3(18), 78–85.
- Varela, J. S. V. (2014). Bandolarium, cuatro obras para bandola sola. (*Pensamiento*), (*palabra*) y obra(11).
- Villacorta, N. L., y Marchiaro, C. A. (2006). Síntesis digital de sonido en tiempo real por modelado físico de instrumentos virtuales de cuerda percutida.
- Von Zur Gathen, J., y Gerhard, J. (2013). *Modern computer algebra*. Cambridge university press.
- Vriend, J. (1981). “nomos alpha” for violoncello solo (xenakis 1966) analysis and comments.
- Vuza, D. T. (1991). Supplementary sets and regular complementary unending canons (part one). *Perspectives of New Music*, 22–49.
- Whittall, A. (2008). *The cambridge introduction to serialism*. Cambridge univ. press.
- Whorley, R., y Conklin, D. (2015). Improved iterative random walk for four-part harmonization. En *International conference on mathematics and computation in music* (pp. 64–70).
- Williams, G. (2012). *Linear algebra with applications*. Jones & Bartlett Publishers.
- Wilson, R. J. (1970). *An introduction to graph theory*. Pearson Education India.
- Winston, P. H. (1992). *Artificial intelligence (3rd ed.)*. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.
- Xenakis, I. (1992). *Formalized music: thought and mathematics in composition* (n.º 6). Pendragon Press.
- Zattra, L. (2005). Analysis and analyses of electroacoustic music. *Sound and Music Computing (SMC05)*, Salerno, Italy, 36.

## BIBLIOGRAFÍA

---

Zimmermann, D. (2001). Modelling musical structures. *Constraints*, 6(1), 53–83.

Zölzer, U., y Smith Iii, J. O. (2003). *Dafx—digital audio effects*. ASA.

---

Apéndice A

## Partitura Simbiosis 1.0

---

### Simbiosis 1.0

2017

para bandola andina colombiana y entidades sónicas

Obra merecedora del estímulo 5-2016 - apoyo para el desarrollo de trabajos de grado en las modalidades investigación-innovación, y/o creación o interpretación de estudiantes de pregrado de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Eddie Jonathan Garcia Borbon, (Colombia, 1991).  
Eddieyogar@gmail.com

### **Notas de Interpretación**

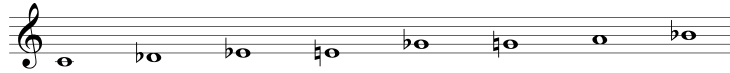
Esta es una obra en la cual la electrónica genera y propone material sonoro de forma autónoma, el intérprete debe tratar de establecer comunicación y dialogo con las entidades sónicas, es decir; imitar, responde, emular o también diferenciarse de lo que proponen las entidades sónicas. El sistema funciona bajo los siguientes parámetros:

1. El intérprete de electrónica será el director y se encargará de controlar los módulos de las entidades sónicas y de indicarle al intérprete cual módulo debe interpretar.
2. La partitura consta de 4 módulos en los cuales están dispuestos unos gráficos a modo de algoritmos los cuales sugieren al intérprete por donde improvisar, cada módulo obedece a una búsqueda o exploración tímbrica, melódica y textural diferente la cual corresponde a las categorizaciones establecidas por Dennis Smalley, el ritmo no esta determinado por lo tanto el intérprete puede improvisar de la forma que desee siempre y cuando responda a lo que proponen las entidades sónicas.
3. En todos los módulos se dispone una escala la cual es definida por el compositor, el intérprete esta en toda libertad de escoger un grupo de notas de la escala que desea interpretar en determinado momento.
4. Adjunto a estas notas de interpretación se le dará al intérprete la tabla de técnicas de la bandola y la categorización de tipología del movimiento propuesta por Smalley con el fin de que conozca a que se refiere cada tipo de movimiento.

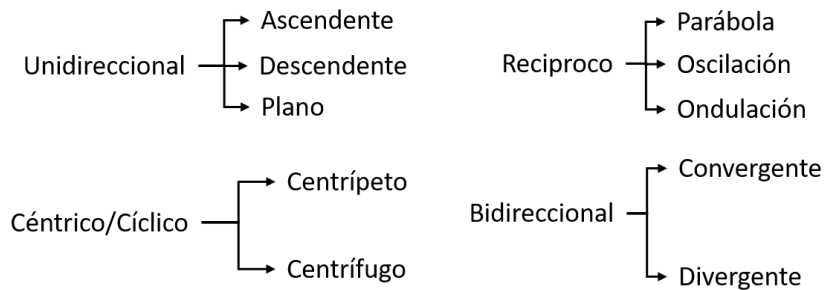
### **Sobre la Partitura**

La primera hoja establece una búsqueda espectromorfológica de tipo nota en torno a las distintas categorías de la tipología del movimiento tiene como característica una previsibilidad máxima, la segunda hoja o módulo pretende una búsqueda y exploración tímbrica por medio de las distintas zonas de ataque del plectro y ejecución de armónicos, su previsibilidad es débil. El tercer módulo se enfoca en una actividad rítmica intensa la cual apoyada con efectos de sonido tiende a una textura granular, su previsibilidad es nula se busca una distribución totalmente imprevisible de las duraciones y una discontinuidad máxima, lo que Grisey denominaría estático. Finalmente, en el ultimo módulo se quiere una exploración tímbrica por medio de efectos percutidos en las distintas zonas de ataque del instrumento.

## Módulo I



La escala asignada para esta versión es la que se ilustra en la imagen. El intérprete debe escoger una nota o un grupo de notas, y escoger un tipo de direccionamiento melódico el cual se describe a continuación, en intérprete puede dirigirse entre movimientos de la misma categoría, es decir; si está en la categoría unidireccional, solo puede tener líneas melódicas ascendentes descendentes y planas.



## Módulo II

Haciendo uso de la misma escala y del gráfico anterior ahora se añade el gráfico que se dispone a continuación, el cual se puede mezclar en la forma que el intérprete desee, es decir; puede interpretar una línea melódica ascendente con plectro de plástico en la región de ataque sul tasto con tremolo controlado.



## Módulo III

Este módulo se caracteriza por una actividad rítmica intensa, el intérprete debe ejecutar acordes o notas repetidas en duraciones muy cortas, las cuales el director por medio de efectos de sonido tratará para lograr una textura granulada.

# Módulo IV

Este módulo se enfoca en efectos o actividad percutida en las distintas zonas del instrumento, el intérprete puede percutir estas zonas a su gusto de la forma que desee

The diagram shows an acoustic guitar with 13 numbered points of interest:

- 1. Cabeza (Cab.)
- 2. Clavijero (Clav.)
- 3. Arpa I (Arp. I)
- 4. Diapason (Diap.)
- 5. Mastil (Mast.)
- 6. Tacon (Tac.)
- 7. (Body)
- 8. Tapa Superior (TS.)
- 9. Aro Inferior (Ar in)
- 10. Tapa Posterior (T.P.)
- 11. Aro Superior (Ar sup.)
- 12. Puente (PT.)
- 13. Arpa II (Arp. II)

Below the diagram are two musical staves, each with a treble clef and a 4/4 time signature:

- Zona A:** Shows rhythmic patterns with 'x' marks on the staff, corresponding to points 1, 2, 3, 4, 5, and 6.
- Zona B:** Shows rhythmic patterns with 'x' marks on the staff, corresponding to points 7, 8, 9, 10, 11, 12, and 13.

### B.1. Código para calcular SPECTRA

```
def spectra(vector):  
    d = 0  
    x = []  
    for i in [1, 2, 2.4, 3, 4, 12]:  
        b = 0  
        c = 0  
        for j in vector:  
            b = b + math.sin((j * 2 * math.pi) / i)  
            c = c + math.cos((j * 2 * math.pi) / i)  
        b = math.pow(b, 2)  
        c = math.pow(c, 2)  
        d = math.sqrt(b + c)  
        x.append(d)  
    return x
```

### B.2. Código para calcular métrica euclídea

```
def euclidean_metric(spectra1, spectra2):  
    b = 0  
    a = 0  
    for i in range(6):  
        a += math.pow((spectra1[i] - spectra2[i]), 2)  
    b = round((math.sqrt(a)), 2)    return b
```

### B.3. Código para calcular distancia angular

```
def angular_distance(spectra1 , spectra2):
    p = []
    q = []
    doublep = []
    doubleq = []
    MagP = 0
    MagQ = 0
    c = 0
    d = 0
    e = 0
    distance = 0
    grados = 0
    acos = 0
    for i in range(6):
        a = spectra1[i] * spectra1[i]
        b = spectra2[i] * spectra2[i]
        p.append(a)
        q.append(b)
        c += p[i]*q[i]
        doublep.append(p[i]*p[i])
        doubleq.append(q[i]*q[i])
        d += doublep[i]
        e += doubleq[i]
        MagP = math.sqrt(d)
        MagQ = math.sqrt(e)

    if (c/(MagP*MagQ)) >= 1:
        distance = math.acos(1)
    else:
        distance = math.acos(c/(MagP*MagQ))

    '''grados = round(((distance*180)/math.pi)/100,2)'''

    return format(distance * 100, '.2f')
```



## C.1. Teoría de Conjuntos

### C.1.1. Distancia angular

El ángulo entre dos vectores,  $\mathbf{P} = (x_1, y_1)$  y  $\mathbf{Q} = (x_2, y_2)$  es el ángulo  $\theta$ , para valores entre  $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$ , Al aplicar ley de los cosenos se obtiene: (Kolman y Hill, 2006)

$$\|\mathbf{P} - \mathbf{Q}\|^2 = \|\mathbf{Q}\|^2 + \|\mathbf{P}\|^2 - 2\|\mathbf{Q}\| \|\mathbf{P}\| \cos \theta. \quad (\text{C.1})$$

Según el teorema de Pitágoras:

$$\begin{aligned} \|\mathbf{P} - \mathbf{Q}\|^2 &= (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 \\ &= x_1^2 + x_2^2 + y_1^2 + y_2^2 - 2(x_1x_2 + y_1y_2) \\ &= \|\mathbf{P}\|^2 + \|\mathbf{Q}\|^2 - 2(x_1x_2 + y_1y_2) \end{aligned} \quad (\text{C.2})$$

Sustituyendo 2.4 en 2.3, siendo  $\|\mathbf{P}\| \neq 0$  y  $\|\mathbf{Q}\| \neq 0$ , se obtiene:

$$\cos \theta = \frac{x_1x_2 + y_1y_2}{\|\mathbf{P}\| \|\mathbf{Q}\|} \quad (\text{C.3})$$

Puesto que el producto punto entre vectores se define como:

$$\mathbf{P} \cdot \mathbf{Q} = x_1x_2 + y_1y_2 \quad (\text{C.4})$$

## C.2. Teoría de Grafos

### C.2.1. Definición Formal

Una cadena de Márkov es una secuencia de eventos aleatorios, la cual describe la transición entre estados por medio de probabilidades. Al conjunto de eventos se le denomina "espacio de estado", mientras que al conjunto de parámetros se le denomina "espacio de parámetros" o "estado del proceso" en un tiempo  $n$  (Schulze, 2009), entonces:

$$P(q_t | q_{t-1}, q_{t-2}, \dots, q_1) = P(q_t | q_{t-1}) \quad (\text{C.5})$$

donde  $q_1, \dots, q_t$  es un conjunto de estados.

## C. DEFINICIONES MATEMÁTICAS

Por lo tanto en una cadena de Márkov la posibilidad de comenzar en un estado  $q_t$ , en un tiempo  $t$ , depende del estado anterior, en un tiempo  $t-1$ .

Suponiendo un sistema el cual tiene  $n$  estados posibles. Para cada  $i=1,2,\dots,n$  y cada  $j=1,2,\dots,n$ . Sea  $t_{ij}$  la probabilidad de que si el sistema se encuentra en el estado  $j$  en cierto periodo de observación, estará en el estado  $i$  en el siguiente:  $t_{ij}$  recibe el nombre de probabilidad de transición (D. L. Isaacson y Madsen, 1976)(Asmussen, 2008). Puesto que  $t_{ij}$  es una probabilidad, se debe tener en cuenta que:

$$0 \leq t_{ij} \leq 1 \quad (1 \leq i, j \leq n). \quad (C.6)$$

Por lo general se distribuyen las probabilidades de transición en una matriz  $T = [t_{ij}]$  de tamaño  $n \times n$ , y a esta matriz se le denomina matriz de transición de la cadena de Markov o matriz estocástica. En donde, en cada fila de  $T$  son no negativas y, de acuerdo con la ecuación 2.9 deben sumar 1 (Ching y Ng, 2006).

Un grafo  $G$  es una terna ordenada  $\mathbf{G} = (\mathbf{V}, \mathbf{E}, \psi)$ , donde:  $\mathbf{V}$  es un conjunto de *vértices* o *nodos*,  $\mathbf{E}$  es un conjunto de *aristas* o *arcos* que relacionan dichos nodos y  $\psi$  es una *función de incidencia* que está asociada con cada nodo a cada par no ordenado de vértices. Si  $e$  es una arista y  $v$  un vértice tal que  $\psi_G(e) = v_1 v_2$ , entonces  $e$  une  $v_1$  con  $v_2$  (Diestel y cols., 2016) (Szeto y Wong, 2006) (Bondy y Murty, 1976) (Wilson, 1970). La figura C.1 representa el grafo  $G$  definido por las siguientes condiciones:

$$G = (V(G), E(G), \psi_g)$$

Donde

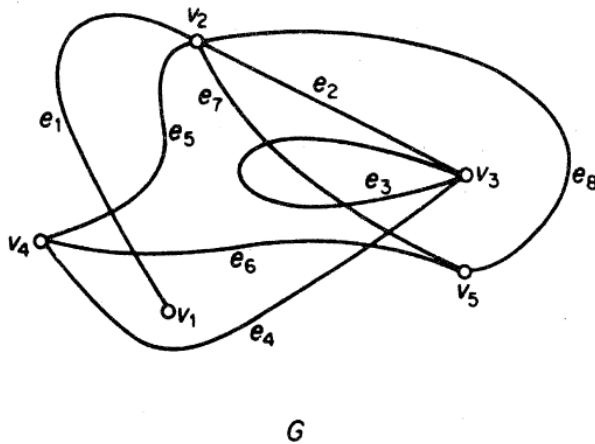
$$V(G) = [v_1, v_2, v_3, v_4, v_5]$$

$$E(G) = [e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7, e_8]$$

Y  $\psi$  es definido por

$$\psi_g(e_1) = v_1 v_2, \psi_g(e_2) = v_2 v_3, \psi_g(e_3) = v_3 v_3, \psi_g(e_4) = v_3 v_4$$

$$\psi_g(e_5) = v_2 v_4, \psi_g(e_6) = v_4 v_5, \psi_g(e_7) = v_2 v_5, \psi_g(e_8) = v_2 v_5$$



**Figura C.1:** Diagrama del grafo G. Imagen tomada de Bondy y Murty (1976)