



PONTIFICIA **UNIVERSIDAD CATÓLICA** DEL PERÚ

Esta obra ha sido publicada bajo la licencia Creative Commons
Reconocimiento-No comercial-Compartir bajo la misma licencia 2.5 Perú.

Para ver una copia de dicha licencia, visite
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

COMPOSITOR AUTOMÁTICO DE MÚSICA ALEATORIA
SIGUIENDO UNA MELODÍA PATRÓN

Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico, que presenta el bachiller:

Marcos José Inoñán Morán

ASESOR: Javier Chang Fu

Lima, agosto del 2010

RESUMEN

La música es una de las actividades de ocio más solicitadas por las personas debido a la gran capacidad de entretenimiento que posee. Es más, hoy en día la Industria del entretenimiento es una de las que más dinero genera a nivel mundial. Es por ello, que muchas empresas intentan ofrecer sistemas innovadores que llamen la atención de las personas. Una de estas actividades es la composición musical.

Cualitativamente, el éxito de una composición se puede medir de acuerdo a la sensibilidad que produce, la atracción e interés que puede tener de las personas. En base a esta idea, los modelos matemáticos aleatorios proporcionan herramientas que simulan este comportamiento.

Hoy en día, las computadoras se han convertido en el principal dispositivo para realizar actividades musicales debido a la evolución que han tenido en sus aplicaciones de multimedia y su alta capacidad de procesamiento.

El presente trabajo explica una forma de realizar una composición musical de manera automática (es decir sin la intervención de las personas) a través de una computadora apoyándose en el uso de las Cadenas de Markov, que son métodos aleatorios utilizados para analizar el comportamiento de varias actividades que ocurren en la vida cotidiana, en este caso en lo relacionado a generación de música.

INDICE GENERAL

Introducción	i
Capítulo 1: LA COMPOSICIÓN MUSICAL EN LA ACTUALIDAD	
1.1 Educación Musical Actual	2
1.2 Relación entre la Música y las Matemáticas	2
1.3 Análisis en los actuales sistemas de composición musical	3
1.4 Primeros métodos de composición automática	5
1.5 La música como factor de entretenimiento y ocio	7
1.6 Demanda de actividades de ocio y entretenimiento en la sociedad.	7
1.7 Declaración del Problema	8
1.8 Conclusiones	10
Capítulo 2: TÉCNICAS Y MÉTODOS DE COMPOSICIÓN MUSICAL AUTOMÁTICA	
2.1 Estado del Arte	11
2.1.1 Presentación del asunto de estudio	11
2.1.2 Estado actual de la investigación	12
2.1.3 Software de composición algorítmica en la actualidad	15
2.1.4 Síntesis sobre el asunto de estudio	17
2.2 Procesos Estocásticos	17
2.3 Cadenas de Markov	17

2.3.1	Cadenas de Markov Discretas	18
2.3.2	Matriz de Transición	19
2.3.3	Estados de las Cadenas de Markov	20
2.4	Interface Digital de Música Instrumental (MIDI)	21
2.4.1	Estructura de un archivo MIDI	21
2.4.1.1	Header Chunks	22
2.4.1.2	Track Chunks	22
2.4.1.3	Meta Eventos	22
2.4.1.4	Mensajes	22
2.5	Modelo Teórico	24
2.6	Conclusiones	25
Capítulo 3: DESARROLLO DEL COMPOSITOR MUSICAL		
3.1	Alcances del Compositor Musical Automático	27
3.2	Desarrollo del Compositor Musical	27
3.2.1	Bloque Intérprete MIDI	28
3.2.1.1	Estructura musical	29
3.2.1.2	Obtención de información musical	30
3.2.2	Bloque Intérprete MIDI	31
3.2.2.1	Matriz de Transición	32
3.2.2.2	Matriz de Notas	32
3.2.2.3	Matriz de Tiempos	33
3.2.2.4	Normalización de las matrices	34
3.2.3	Bloque Algoritmo y Generador Musical	34

3.2.3.1	Inicio de la secuencia de notas	37
3.2.3.2	Secuencia de Notas aleatorias	37
3.2.4	Cuidados en las Cadenas de Markov para la composición	37
3.2.4.1	Estados absorbentes	37
3.3	Duración de la Melodía	39
3.4	Melodía creada en formato MIDI	40
3.5	Conclusiones	41
Capítulo 4: EVALUACIÓN DEL COMPOSITOR MUSICAL		
4.1	Descripción de Métodos empleados	43
4.1.1	Pruebas Cualitativas	43
4.1.2	Pruebas Cuantitativas	44
4.1.2.1	Matriz de transición por medio de colores.	44
4.1.2.2	Carga Computacional	47
4.2	Documentación de melodías	49
4.3	Conclusiones	50
Conclusiones		51
Recomendaciones		53
Bibliografía		54
Anexos (sólo disponible en CD)		57

INTRODUCCIÓN

La composición musical es una actividad artística que consiste en la creación de música. Debido al alto grado del conocimiento musical, experiencia e inspiración que esta exige, sólo los músicos experimentados están en capacidad de realizarla. Con el fin de que aficionados o compositores novatos puedan desarrollar trabajos musicales propios, esta tesis ofrece un sistema capaz de generar melodías de manera aleatoria que sirvan como una base para una composición más elaborada.

Para ello, este estudio recurre al uso de Cadenas de Markov, que son procesos estocásticos que muestran un comportamiento aleatorio pero controlado, es decir, que no es flexible a todos los caminos de la indeterminación, sino que varía de acuerdo a un patrón definido.

Es así que el sistema propuesto será capaz de generar melodías aleatorias a partir de una melodía de entrada, de la cual toma su estructura y patrón musical. El usuario deberá ingresar el tiempo que dure la melodía aleatoria y la melodía patrón, la cual debe estar en formato MIDI para que el sistema produzca una melodía bajo el mismo formato. Esta melodía podrá ser escuchada en varios reproductores multimedia y puede ser vista sobre un pentagrama bajo algún software editor de partituras musicales, lo que permite un análisis más completo de la misma.

En el Capítulo 1 se analizarán los efectos de la música en nuestras vidas a través de nuestra historia y se indica el nivel de cultura musical que existe en el Perú. Luego, se hace una reseña de la relación que hay entre la música y las matemáticas desde tiempos antiguos. A partir de eso, se informa acerca de los tipos de sistemas de composición musical, entre ellos los que realizan la composición automática elaborando un resumen de los trabajos realizados en base a la composición aleatoria. Para finalizar, se remarca la gran atracción que sienten

las personas ante productos que les generen entretenimiento, estando la música dentro de ese rubro.

En el Capítulo 2, se realizará un análisis acerca de diversas maneras de generar música aleatoria, en su mayoría apoyándose en diversos modelos matemáticos, de los cuales se tienen las Cadenas de Markov. Además, como parte del estado del arte se presenta un software que realiza composición musical automática. A partir de ello se explica la teoría necesaria para el desarrollo del sistema propuesto, como Cadenas de Markov, sus estados y el Protocolo MIDI.

En el Capítulo 3 se muestra el desarrollo del sistema, definiendo sus alcances y limitaciones. Se inicia explicando en detalle la elaboración del software definiendo cada etapa, comentando algunos cuidados a tener en casos especiales. Además, se detalla la manera de acercarse a una distribución probabilística desconocida a partir de una uniforme, de manera intuitiva.

Por último, en el Capítulo 4 se mostrarán los resultados encontrados de manera cualitativa y cuantitativa obtenidos en este estudio.

...de transición de una cadena de Markov con 3 estados...

CAPÍTULO 1

LA COMPOSICIÓN MUSICAL EN LA ACTUALIDAD

La música es parte de nuestras vidas, más allá de la actividad a que nos dediquemos, la religión que practiquemos o donde vivamos, está siempre y al igual que nosotros va evolucionando y se va haciendo más importante en la sociedad.

La influencia de la música en nuestras vidas se puede ver desde muchos ángulos, desde muchos aspectos, y no sólo de hechos triviales. Tan solo para citar un ejemplo, cada país tiene una música como símbolo nacional, que representa e identifica a todos sus pobladores, como es el caso del Himno Nacional.

Esto se debe al poder que tiene la música sobre nosotros, es capaz de producirnos sensaciones irremplazables e irrepetibles. Nos enseña, nos acompaña en la soledad, nos hace viajeros en el tiempo recordándonos una época anterior, incluso, la música ha incursionado en el campo de la salud, hoy existe el concepto de “terapia musical”, que según la facultad “*Boyer College of Music and Dance*” de la Universidad de Temple de Pensilvania, está definido como el proceso en el cual un terapeuta usa la música en todas sus facetas para mantener o mejorar la salud de las personas [1].

Es así que la elaboración de la música representa una actividad trascendental en la sociedad, por lo que los compositores musicales han dado un gran aporte al desarrollo de nuestra civilización con sus composiciones.

Sin embargo, a pesar de ser la música, una de las actividades que están permanentemente presente en nuestras vidas, resulta muy difícil entender su

comportamiento, ya que hasta ahora no sabemos la razón del porqué una secuencia de tonos tiene el poder de cambiarnos emocionalmente [2].

1.1 Educación Musical Actual

Actualmente son pocas las personas que están en condición de componer música, debido que es necesario tener altos grados de conocimientos musicales, además de un considerable nivel de inspiración y la capacidad de plasmar ello sobre una partitura, que es el medio por el cual los músicos escriben música, usando una notación musical.

En el Perú el panorama de la educación musical actual es desalentador, ya que los docentes han perdido el interés en profundizar los principios filosóficos y psicopedagógicos que sustentan una buena educación. Además en nuestro país la música (tal como otras materias del campo artístico), tienden a ser eliminadas de la currícula como materia obligatoria [3].

Es por ello que surge la necesidad de realizar sistemas de composición automáticos, con el fin de acercar la música a las personas y motivarlos a introducirse en ella.

1.2 Relación entre la Música y las Matemáticas

Desde hace muchos años se ha intentado entender la música y el efecto mágico que tiene sobre nosotros, pero ¿qué herramienta se puede usar para entender algo tan abstracto como la música?, la respuesta sería otro ente que sea de igual de abstracto, las matemáticas.

Hace más de 2500 años, Pitágoras de Samos (580 AC), sostenía que los números lo eran todo y nada se podía concebir o explicar sin ellos. Él buscó unificar los fenómenos del mundo físico y espiritual mediante números, es más, tenía la idea de que estos mundos estaban relacionados en proporciones de números enteros, esta idea no estaba tan lejana a la verdad, pues fue uno de los primeros en estudiar la naturaleza de los sonidos musicales de forma experimental (ya que en ese entonces no se conocía teorías de ondas, armónicos, etc). Así que se dio cuenta que una cuerda que produce un sonido, al cortarla por la mitad produciría un sonido

armonioso con respecto al de la cuerda original, así que esta relación numérica de 1 a 2 era una importante confirmación a su teoría. [4]

Hoy, con teorías de ondas, frecuencias y armónicos ya establecidas sabemos que si dos notas tienen una proporción de 2:1 en sus frecuencias fundamentales, ellas corresponden a la misma nota con una octava de diferencia, y al tocarlas juntas producen un acorde agradable a nuestros oídos.

Pitágoras creía también que los cuerpos celestes que giraban al centro de la tierra producían un sonido hermoso, el cual llamó “Música de las esferas”. 2000 años más tarde, un matemático alemán Johannes Kepler (1571-1630), mejoró esta teoría estableciendo que los planetas que giraban alrededor del Sol producían diferentes sonidos debido a las diferentes velocidades con la que giran; sostenía que podía determinar el sonido fundamental que estos cuerpos emitieran si se supiera su masa y la velocidad [5].

1.3 Análisis en los actuales sistemas de composición musical

Actualmente, la principal herramienta de composición musical ha recaído sobre las computadoras, ya que estas tienen una gran capacidad para realizar procesamiento y permiten interactuar con el usuario de manera fácil.

Se puede considerar que hay 02 maneras en la forma de componer una melodía musical. Estos modos están relacionados principalmente en el grado de ayuda que reciben los compositores de parte del sistema. Por lo tanto según la interacción con el usuario se pueden dividir en 02 partes:

A. *Sistemas que acompañan una melodía*

Estos programas son dirigidos para quienes tienen la habilidad y el talento de componer melodías, pero no la suficiente educación musical para poder plasmarla sobre una partitura musical o acompañarse con un instrumento musical.

Para ello, el compositor empírico debe cantar su canción a través de un micrófono, tal como se muestra en la Figura 1 para que el software analice la señal, obtenga la frecuencia fundamental y genere tonos similares de modo sintetizado.

En estos casos, los programas no componen por sí mismos, sino que necesitan de una entrada para imitar la melodía de entrada, estos casos se dice que el software acompaña la melodía. Estos sistemas son denominados “voice to note” (voz a nota); porque conecta la voz con una nota musical.

Estos software cumplen en gran manera el propósito de los aficionados que tienen deseos de convertirse en compositores musicales, pero presentan algunas debilidades, debido a que la calidad de la señal de entrada depende tanto de la calidad del micrófono, como del nivel de aislamiento de la voz y hasta de la capacidad de canto que tengan los usuarios.



Figura 1 Compositor musical que acompaña la melodía

B. Sistemas que componen automáticamente una melodía

Estos son dirigidos para personas que quieren obtener música de manera automática, es decir, con una nula o mínima intervención de ellos. Estos sistemas intentan imitar la actividad creativa de componer música, por lo general estos sistemas componen a partir de estilos musicales pregrabados, o en todo caso componen a partir de una canción original, como se ve en la Figura 2.

Estos van dirigidos principalmente a personas interesadas en componer música pero que no tienen la suficiente experiencia para obtener estilos musicales, así que estos sistemas les ofrecen una base para una composición musical más elaborada.

A diferencia del primer caso, estos sistemas crean música por sí mismos y con el fin de darle un sentido de improvisación a la composición, estos programas usan algoritmos probabilísticos. Así que, mientras más cercano a la música sea el modelo matemático a usar, la composición tendrá más variantes musicales que le den un sentido más amplio de estética, armonía e improvisación.

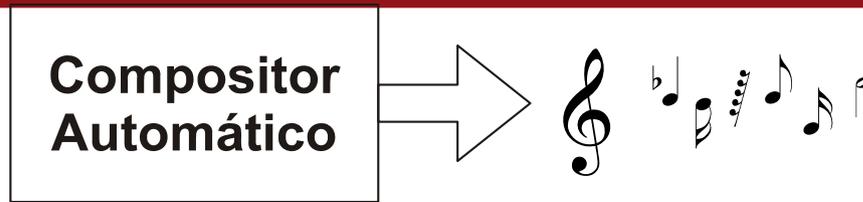


Figura 2 Compositor musical automático

1.4 Primeros métodos de composición automática

La composición automática basa sus resultados a partir de la aleatoriedad, por lo que las melodías que resulten de ella son una consecuencia de reglas y conceptos probabilísticos. Desde hace muchos años se ha recurrido a métodos no determinísticos para crear música los estos cuales se detallan a continuación:

Guido de Arezzo, un monje italiano del siglo XI (992 – 1033 DC) fue reconocido como el autor del sistema que los músicos usan para escribir e interpretar una composición musical, aunque cabe destacar que fue uno de los pioneros que contribuyó en realizar una composición musical aleatoria, su método era relacionar sílabas con notas musicales. Según el ejemplo que se muestra en la **Figura 3**.

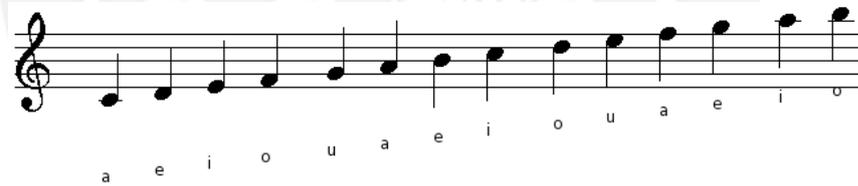


Figura 3 Asignación de vocales a notas musicales de Guido de Arezzo

Es así que con esta distribución entre notas y vocales podría componer cualquier melodía, dependiendo de las palabras del canto, por ejemplo, si se quería componer una canción con letra "Guido d' Arezzo", el resultado de la melodía sería la partitura que se muestra en la Figura 4.



Figura 4 Ejemplo de composición usando el método de Guido de Arezzo

Otro personaje que contribuyó en la composición del tipo aleatorio, fue nada más y nada menos que Wolfgang Amadeus Mozart (1756 - 1791), uno de los más grandes genios musicales de la historia, quien creó una composición musical a partir del lanzamiento de dados.

A este trabajo se llamó "Music Dice" (Música de Dados). Esta se creaba a partir de 176 compases (porciones pequeñas de canciones) que estaban divididos en 16 grupos de 11. La canción resultante siempre era de 16 compases, por lo que había que escoger un compás de los 11 que conformaban un grupo, esta elección se hacía mediante 02 dados cuya suma nos dan 11 posibilidades (del 2 al 12). Bajo este método se pueden crear hasta 45,949 billones de canciones (11^{16}). Si se quisiera escuchar todas las canciones que se podrían componer con este método tardaría muchos miles de años.

Cabe resaltar también, el aporte de John Cage (1912 - 1992), un compositor norteamericano que fue uno de los impulsores de la música no convencional. Él realizó numerosas composiciones musicales basadas en la aleatoriedad, una de las más conocidas fue "Reunion", obra realizada en marzo de 1968, la cual se generó a partir de un juego de ajedrez.

Este sistema consistió de un tablero de ajedrez electrónico, construido por Lowell Cross especialmente para este propósito, cada vez que un jugador movía una pieza de un lugar a otro, se emitía un sonido que era una mezcla de ruidos. El concierto duró aproximadamente 4 horas y media. En la Figura 5 se muestra dicho tablero.

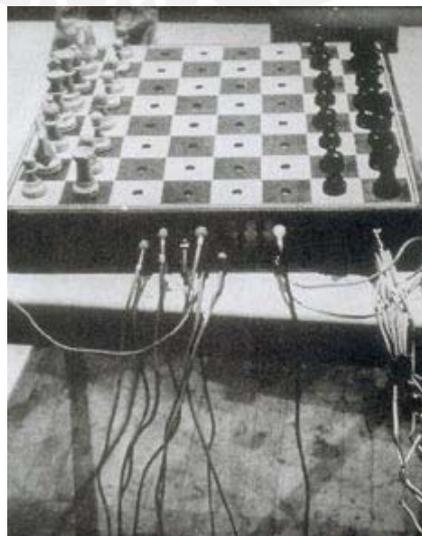


Figura 5 Tablero electrónico de ajedrez, diseñado por Lowell Cross [6].

Es importante mencionar, que un músico peruano, Leopoldo La Rosa fue alumno de John Cage cuando fue a hacer sus estudios en el exterior. Ambos participaron en la composición de la obra musical del tipo no convencional “RUMORI ALLA ROTONDA”, la cual fue publicada en enero de 1959 [7].

1.5 La música como factor de entretenimiento y ocio

Como se ve, hay mucho interés en simular el talento de un compositor. Uno de los factores por el cual este tema es profundamente estudiado, se puede analizar también desde el punto de vista comercial debido a que la música es un producto con mucha demanda

La industria del entretenimiento, se constituye hoy en día como uno de los grupos más importantes y de mayor crecimiento en la economía mundial [8]. Dentro de este sector se encuentra la música, que, con la aparición de tecnologías digitales, ha desarrollado un crecimiento notable, y ello obliga a las empresas de este rubro a innovar constantemente sus productos, con el fin de cubrir las necesidades de sus clientes.

Estos productos, no sólo son atractivos para los usuarios por las funciones que ejecutan, o las melodías que producen, sino esencialmente porque educan al cliente musicalmente haciendo que este aprendizaje especializado sea más fácil.

Una de las características más destacadas de estos productos, es que se presentan como software de computadora, ofreciendo a los usuarios facilidad de una composición musical. Mayormente, estos productos están orientados para consumidores con poco o ningún conocimiento musical.

Es por ello, que los proveedores intensifican sus investigaciones, en desarrollar sistemas musicales que sean capaces de interesar a personas casi sin una previa educación musical, y así aumentar su mercado.

1.6 Demanda de actividades de ocio y entretenimiento en la sociedad.

El entretenimiento es una actividad añorada por el hombre, porque captura y mantiene su atención, los distrae, ameniza su vida propiciando que sea más llevadera y liberándoles del estrés y en el fondo, los hace sentir más felices.

Por ello, tiene un papel importante en la mejoría de la calidad de vida de la sociedad, porque ofrece una opción para el uso constructivo del tiempo libre, descienden los índices de violencia y la convivencia es más armónica. Por el contrario, cuando el tiempo libre no tiene muchas opciones para ser aprovechado, se generan vicios y problemas. Bajo todos estos argumentos; se puede decir que las personas están dispuestas a pagar para que los entretengan.

Es debido a ello, que el entretenimiento revolucionó el mundo de los negocios, y por ende hay empresas grandes dedicadas a generarlo. Esta industria, tiene una gran demanda en el mercado, factura al año 1,8 trillones de dólares americanos, y cuyo crecimiento es mayor al crecimiento de la economía mundial como un todo. [9]

En comparación con todas las actividades de ocio y entretenimiento, las personas ocupan el 65% de su tiempo libre en escuchar música [10]. Además la música no tiene barreras de género, idioma, político o religión; ya que posee un lenguaje universal.

Otro punto a favor de la música, es que es visto como una actividad cultural, como un arte, por lo que no tiene ningún rechazo de la sociedad, tal como sucede en el caso de los videojuegos que generan ciertos efectos negativos.

Con estos datos, podemos concluir que el mercado de la música es extenso; pero que la gran parte se concentran en escucharla; sólo juegan un papel pasivo en este ambiente, debido a que pocos tienen una base musical; si pudiéramos llamar la atención de ese 65% que tiene a la música como una de sus actividades favoritas para *hobby*, e introduciéndolos a acercarse a la música como intérpretes más que como espectadores; tendríamos un mercado de dimensiones gigantescas.

1.7 Declaración del Problema

La música en la industria del entretenimiento tiene un enorme mercado, debido al gran atractivo que tiene en las personas que encuentran una gran satisfacción al percibir sonidos armoniosos, pero la mayoría se dedica solo a escucharla y no a intentar crearla debido a que poseen muy poca una educación musical y no dominan algún instrumento musical.

Para crear música es necesario tener un considerable conocimiento musical, una determinada experiencia para captar estilos musicales conocidos y tener un determinado grado de inspiración. A pesar de ello hay personas que tienen un interés en componer, aunque debido a su poca o nula experiencia como compositores, les es necesario conocer distintos estilos musicales que les permita generar sus propias composiciones de una forma más concisa y respaldada.

Por ello, es necesario generar numerosas canciones que tengan un estilo similar, con el fin de que el novato compositor pueda desarrollar composición con una base armoniosa.

Además, para un mejor estudio de estos estilos, no sólo sería necesario escuchar la melodía, sino que ayudaría mucho tener una documentación de cada canción creada, es decir, plasmarla sobre una partitura musical, con el fin de interpretarla o adecuarla a algún instrumento musical.

En contraste, una generación automática de melodías ayudaría a los aspirantes a compositores a analizar y obtener estilos musicales, moldearlos para su propósito, y facilitar su aprendizaje de crear música. Además, de documentar sus resultados para realizar un análisis más detallado de los estilos obtenidos.

1.8 Conclusiones

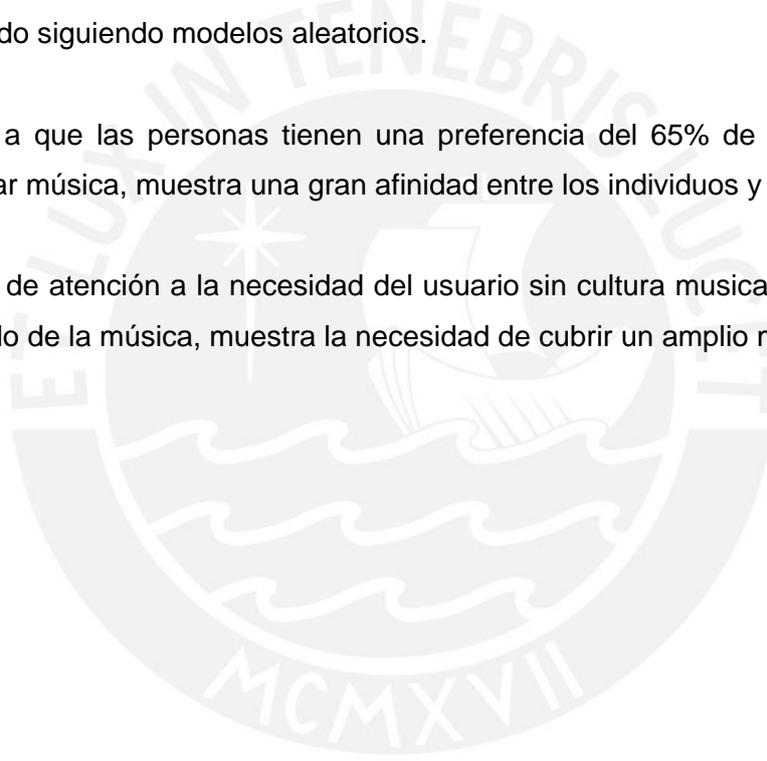
La música influye en la sociedad de manera trascendental, ya que refleja el carácter y época de la humanidad, adquiriendo importancia en nuestras vidas ya que incluso se usan como una herramienta para mejorar la salud.

A pesar de su popularidad, la comprensión de la música es abarcada sólo por un grupo pequeño de personas, esto se profundiza más debido a que la educación musical no es prioridad en las escuelas de algunos países como el Perú.

Desde la antigüedad se han relacionado a las matemáticas con la música, sobretodo siguiendo modelos aleatorios.

Debido a que las personas tienen una preferencia del 65% de su tiempo libre a escuchar música, muestra una gran afinidad entre los individuos y las melodías.

La falta de atención a la necesidad del usuario sin cultura musical, de incorporarse al mundo de la música, muestra la necesidad de cubrir un amplio mercado.



CAPÍTULO 2

TÉCNICAS Y MÉTODOS DE COMPOSICIÓN MUSICAL AUTOMÁTICA

Planteada la necesidad de ofrecer una herramienta para la composición de melodías musicales; se propone un sistema que genere melodías de forma automática.

El presente capítulo se inicia presentando el estado actual de la tecnología en software de composición musical, mostrando sus diferentes tipos de funcionamiento e interacción con el usuario. Con ello, se definen los conceptos básicos para poder abordar el tema.

La investigación realizada muestra que existen distintas maneras de ayudar al usuario a componer sus melodías, con una mínima interacción suya o sin ella, para eso se recurre a diferentes modelos y técnicas, que hacen que el sistema emule a un compositor y generar las melodías musicales requeridas.

2.1. Estado del Arte

2.1.1. Presentación del asunto de estudio

Los sistemas de composición musical son sistemas que ayudan al usuario a componer melodías musicales. En su mayoría, estos sistemas son software de computadora que realizan una serie de algoritmos para llegar a tal propósito. Muchos de ellos brindan una ayuda parcial o total al compositor, dependiendo de sus alcances. Estos sistemas se dividen en los siguientes módulos:

- (i) Interpretación y análisis de la información de entrada.
- (ii) Aplicación de algoritmos matemáticos
- (iii) Generación la música creada

En el desarrollo de estos sistemas se busca obtener una correcta interpretación de la información musical en tonos y tiempos para generar melodías que tengan mayor grado de armonía y estética.

Se empieza por analizar los diferentes tipos de sistemas de composición, qué información de entrada necesitan y de qué manera se debe ingresar esa información; luego se nombran los distintos procedimientos de estos compositores para lograr resultados que dejen satisfecho al usuario.

De todos los casos analizados se observa que el modelo de generación de música en base a Cadenas de Markov, permite hacer una composición armoniosa y que capta de manera satisfactoria los estilos musicales, sin necesidad de hacer uso de una carga computacional alta.

2.1.2. Estado actual de la investigación

El mejor sistema de composición que conocemos es la mente de un artista. Y la mejor manera de intentar igualar ese sistema son realizando una serie de algoritmos matemáticos que permitan acercarnos a la meta.

Hay 03 formas de composición musical algorítmica, (i) aquellas que siguen reglas específicas para generar nuevas melodías, (ii) las que aprenden patrones de melodías y (iii) aquellas que usan evolución para producir música siguiendo criterios de estética [11].

A continuación se detallará cada una de las técnicas y se mostrará sus debilidades.

Los compositores que siguen reglas específicas, son tal vez la manera más intuitiva para componer música artificial, debido a que la música va apareciendo siguiendo reglas musicales, por lo general estas reglas son sencillas de plasmarlas sobre un computador, ya que sigue dependiendo de una secuencia aleatoria va escribiendo partes pequeñas de canciones. Un claro ejemplo fue el mostrado en el “Juego de dados de Mozart”, que fue una composición hecha a partir de compases establecidos (canciones cortas pre-grabadas). Así que hacerlo en un computador sería generando números aleatorios.

Una gran desventaja de este tipo de compositores es que son bastante predecibles, debido a que los compases pregrabados son los mismos y no tienen un estilo claro

ya que los compases ingresados no son controlados y el resultado es una mezcla confusa y poco estética ya que el nivel de armonía es bajo. [12]

En la Figura 6 se muestra un diagrama de flujo de este tipo de compositores.

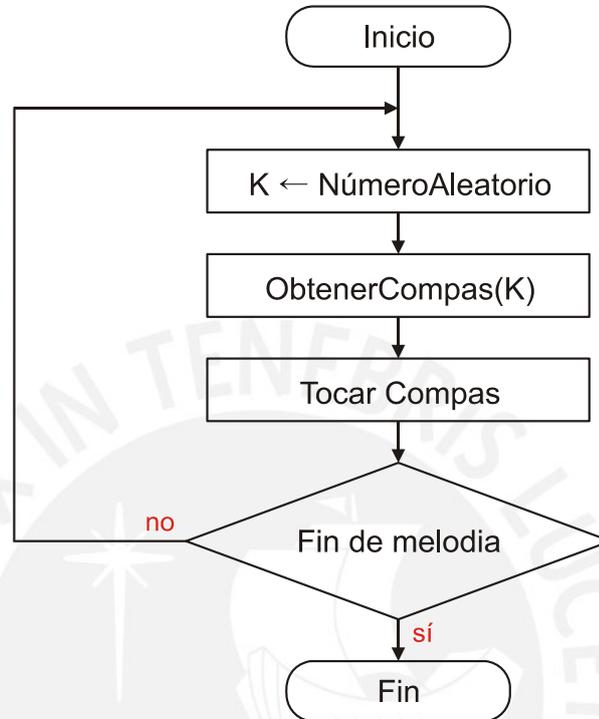


Figura 6 Diagrama de flujo de compositores que siguen reglas

Por otro lado, hay compositores que generan música a partir de un entrenamiento, estos sistemas aprenden un estilo musical, y lo usan para crear melodías. Este entrenamiento consiste en obtener los patrones de alguna composición base, que sería una entrada del sistema. Estos sistemas capturan el estilo base de la entrada a partir de probabilidades de transición de tonos musicales, basados en la frecuencia de transición de notas del estilo base. Por lo general, las canciones base son escogidas dependiendo del tipo de música que se quiere crear, es decir si el usuario quisiera tener una composición al estilo Chopin, la composición base debería ser de Chopin, para que la melodía se cree con una estructura musical similar.

Este proceso es más completo que el anterior, ya que posee una secuencia más armónica y estéticamente tiene más solidez. Debido a su naturaleza no determinística tiene cierto grado de improvisación aunque muchas veces la composición puede resultar repetitiva (puede caer en lazos repetitivos) o vaga (no tener relación con el ritmo de la señal de entrada).

Para estos tipos de sistemas se usan Cadenas de Markov, que pueden modelar de manera adecuada esta idea. En la Figura 6 se muestra un diagrama de flujo de este tipo de composición siguiendo Cadenas de Markov.

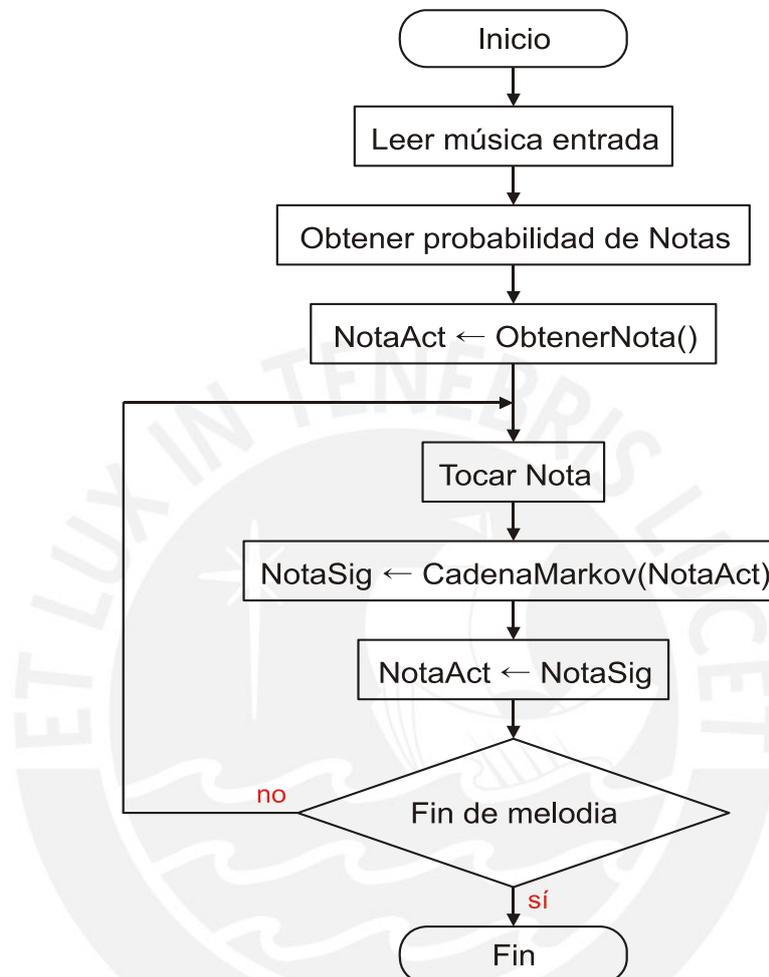


Figura 7 Diagrama de flujo de compositores que aprenden patrones musicales

Los Compositores que usan evolución para producir música, son sistemas cuyo funcionamiento se basan en la utilización de algoritmos genéticos, una técnica propuesta por Jhon Holland, y están basados en la teoría de la evolución de Charles Darwin. Por lo tanto, son sistemas que siempre intentan encontrar soluciones a diversos problemas. Estos reciben como entrada a los candidatos a una solución y retornan como salida cuáles son aquellos que ofrecen una solución más eficiente, con el fin de que se reproduzca, simulando una supervivencia del más apto.

Incluso usan los mismos términos, ya que trabajan con una población de individuos, sus posibles soluciones son codificadas y se les llama cromosomas, además hay

un juego de operadores que de manera aleatoria modifican parte del cromosoma, a esto se le llama mutación, una función de evaluación para saber que tan eficientes son y un método de selección natural, para elegir los cromosomas que serán utilizados en la siguiente etapa.

La aplicación de estos algoritmos son usados en la composición musical debido a que no se tratan de una técnica especializada sino que se trata de una solución buena para problemas abiertos y que buscan un nivel de perfección, aunque cabe señalar que al tratarse de un algoritmo paralelo consumen un alto consumo computacional y su tiempo para encontrar la mejor solución puede ser muy largo dependiendo de la forma de cómo estén implementados y de qué forma esté limitado su espacio de búsqueda.

Como se puede ver, este proceso es más complejo y aunque tiene un relativo éxito, sus resultados son subjetivos, ya que la opinión de una misma composición recibe distintas impresiones, debido a que los resultados de este tipo de algoritmos dependen del proceso de selección usado, que se comporta como el crítico de música. [13]

Después de revisar algunos métodos de composición automática para la presente tesis, se ha elegido los sistemas que componen a partir de un entrenamiento previo, debido a la relativa simpleza de su elaboración, además del nivel de armonía obtenido. Sin embargo, el presente trabajo complementa este método con otros métodos probabilísticos para obtener un estilo más cercano al de la melodía patrón a seguir, tal como hacerle un estudio estadístico a los tiempos de duración de las notas, etc.

Otro factor a tomar en cuenta, es la utilidad para el usuario de obtener información de la composición no sólo a través del sonido de ésta, sino que resulta importante para un mejor estudio de la misma, que dicha melodía quede documentada, es decir que pueda ser almacenada en un archivo y que sea escrita sobre una partitura musical.

2.1.3. Software de composición algorítmica en la actualidad

En el siguiente estudio se presenta el siguiente sistema de composición algorítmica, con sus ventajas y desventajas.

Common Music

Es un software de composición musical, que genera música algorítmica en tiempo real, diseñado para asistir a compositores, aplicando varios métodos estocásticos para generar melodías. Es gratuito y trabaja sobre el Sistema Operativo Linux. Fue desarrollado por Julian Storer y William Schottstaedt.

Common Music cuenta con su entorno gráfico, llamado Grace -Graphic Realtime Algorithmic Composition Environment, por sus siglas en inglés – que facilita la interacción con el usuario [14], para eso emplea un teclado virtual, tal como se ve en la Figura 8.

Además, emplea diversos algoritmos matemáticos para la composición, y cuenta con una caja de herramientas muy amplia, debido a su amplio rango de funciones y métodos. Así que ofrece al usuario la facilidad de obtener distintos patrones musicales para una determinada composición, mediante el uso de varios algoritmos. Además, con el fin de obtener datos aleatorios, ofrece al usuario varios tipos de distribuciones probabilísticas. Common Music trabaja con varios formatos de audio, entre ellos el MIDI.

En conclusión, este programa brinda al cliente una alta variedad de combinaciones en aspectos musicales, en contraste se puede concluir que debido a su diversidad resulta complejo utilizarlo, no sólo para alguien que tiene poco conocimiento y experiencia musical, sino que también lo sería además para alguien que no maneje ciertos conceptos matemáticos y no tenga conocimientos de programación.

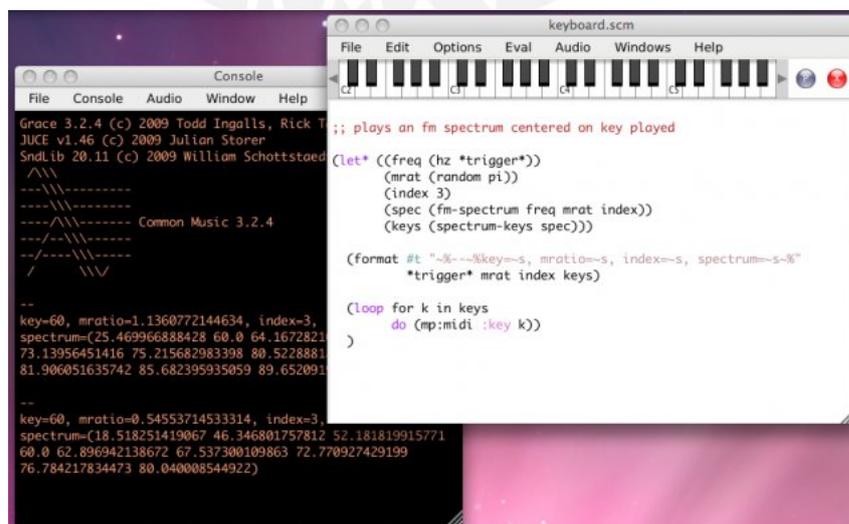


Figura 8 Vista del programa Common Music [15]

2.1.4. Síntesis sobre el asunto de estudio

- Debido a la necesidad de elaborar composiciones musicales por parte de personas con poca educación musical, se han realizado sistemas que realizan composición automática para ayudar al usuario a lograr tal fin.
- Para realizar una composición es importante obtener un estilo musical, pues a partir de este patrón musical se obtendrá una melodía con un grado de estética y armonía aceptable.
- Existen diversos algoritmos que intentan modelar el procedimiento de la composición musical, incluyendo el grado de originalidad de un compositor.
- Uno de los algoritmos más conocidos para generar composiciones son las Cadenas de Markov.
- Debido a que los conocimientos de algoritmos matemáticos y la música no están relacionados, es poco probable que un músico domine ambos campos, por lo que el sistema debe ser transparente al usuario, con el fin de darle mayor facilidad de uso.
- La generación de música debe ser documentada para un mejor análisis posterior de parte de los músicos.

2.2. Procesos Estocásticos

Son procesos que evolucionan de manera aleatoria en el tiempo. El conjunto de todos los valores que puede tomar este proceso se le llama espacio de estados. Estos pueden ser discretos o continuos, dependiendo de la naturaleza de sus estados y tiempos.

Un clásico ejemplo de estos procesos es la llamada “Ruina del Jugador”, que consiste en una apuesta, que empieza con “n” soles. En cada apuesta se tiene la probabilidad “p” de ganar un sol o la probabilidad “q” de perder un sol ($p+q=1$). Entonces en el instante $t_0=0$, se tiene n soles ($X_n=n$), y si se gana, en el estado $t_1=1$, se tendrá “n+1” soles ($X_{n+1}=n+1$), o se pierde se tendrá “n-1” soles ($X_{n+1}=n-1$). La secuencia de resultados luego de cada apuesta obtenida es un espacio de estados (X_0, X_1, X_2, \dots) en un tiempo 0, 1, 2,

2.3. Cadenas de Markov

Las cadenas de Markov son los modelos matemáticos más simples para fenómenos aleatorios a lo largo del tiempo, pero a la vez son los más importantes

debido a su simple estructura, es más, cualquier modelo matemático de procesos aleatorios puede ser representado como una generalización de una Cadena de Markov, este modelo es usado para representar muchas aplicaciones, entre ellas la composición musical [16].

Este método fue postulado por el matemático Ruso Andrey Andreyevich Markov (1856-1922), y representa una serie de antecedentes que contribuyen a la probabilidad de un evento subsecuente [17].

Como en todos los procesos estocásticos, las cadenas de Markov ocurren sobre un espacio de estados al que llamaremos S y nuestros instantes de tiempo serán T.

Las Cadenas de Markov, como todo proceso estocástico se pueden clasificar en discreto o continuos, para el presente estudio, se trabajarán con Cadenas de Markov discretas..

2.3.1. Cadenas de Markov Discretas

Una Cadena de Markov discreta consiste en una secuencia de variables aleatorias cuyos valores en el tiempo son discretos y sus estados posibles tienen valores discretos, cuando además estos estados son finitos, se dice que es una Cadena de Markov finita. El presente estudio realiza la utilizando cadenas finitas.

El orden de una cadena de Markov se determina según la cantidad de antecedentes que influyan en el salto a un evento siguiente, por lo que se dice que una cadena de Markov es de orden “k”, si la probabilidad de salto a un estado dependiera de los k estados anteriores.

Por lo tanto en una cadena de orden k, la probabilidad de ir al estado j, habiendo estado en los estados i, i_1, i_2, \dots, i_k , es igual a:

$$P(i_k | i_{k-1}, \dots, i_1, i) = P(i_{k-1} | i_{k-2}, \dots, i_1, i) = P(i_{k-2} | i_{k-3}, \dots, i_1, i) = \dots = P(i_1 | i) = P(i_1 | i)$$

El presente estudio utiliza Cadenas de Markov de primer orden, en ese caso se puede simplificar su expresión matemática de la siguiente manera:

$$P(i_{k+1} | i_k, \dots, i_1, i) = P(i_{k+1} | i_k) = P(i_k | i) = P(i_k | i)$$

2.3.2. Matriz de Transición

Cada estado X_i que pertenece a nuestro espacio de estados S tiene una probabilidad de saltar a otro estado X_j . Si la suma de todas las probabilidades de salto del estado X_i es 1, entonces se tiene una distribución.

En una Cadena de Markov las probabilidades de salto son parte de una distribución. Para poder representar esta característica de manera adecuada, estas probabilidades se agrupan dentro de una matriz, llamada Matriz de Transición.

Para una Cadena de Markov, cuyo espacio de estados consta de “k” estados, su matriz de transición es:

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1k} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{k1} & p_{k2} & \cdots & p_{kk} \end{bmatrix}$$

Ya que las probabilidades se representan de la forma p_{ij} , se interpreta a i como el estado actual y a j como el estado siguiente. Es decir, p_{ij} es la probabilidad de que del estado i vaya al estado j . Además se cumple que la suma de cada fila en la matriz es 1.

Una representación gráfica de las transiciones de las Cadenas de Markov es a través de arcos y nudos, donde los nodos representan los estados y los arcos la transición misma. Si la probabilidad de un estado es 0, no se dibuja arco alguno. Un ejemplo se muestra en Figura 9, un diagrama de transición que consta de 03 estados.

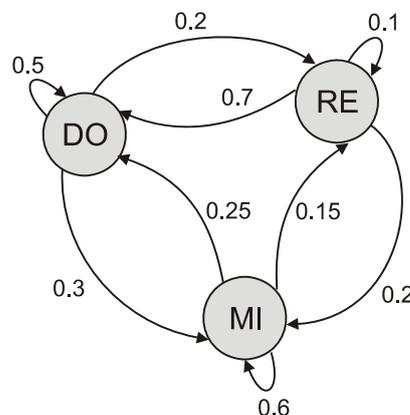


Figura 9 Diagrama de transición de una cadena de Markov de 03 estados

Y su respectiva Matriz de transición, en la tabla Tabla 1

	Do	Re	Mi
Do	0.5	0.2	0.3
Re	0.7	0.1	0.2
Mi	0.25	0.15	0.6

Tabla 1 Matriz de transición de una cadena de Markov de 03 estados

2.3.3. Estados de las Cadenas de Markov

A partir de las probabilidades de transición que se dan en una cadena de Markov se pueden clasificar los siguientes estados:

a. Estado accesible

Un estado j es accesible desde un estado i , si se puede llegar a él en un número finito de “ n ” de pasos.

$$P_{ij}^{(n)} > 0, \quad P_{ji}^{(n)} > 0$$

b. Estado absorbente

Un estado i es absorbente cuando no se puede alcanzar otro estado, excepto a sí mismo. En la Figura 10 se muestra un estado absorbente a través de un diagrama de transición

$$P_{ii}^{(n)} = 1$$



Figura 10 Diagrama de transición de un estado absorbente

c. Estado recurrente

Un estado i es recurrente cuando se tiene la certeza que retornará a ese estado.

d. Estado transitorio

A diferencia del estado recurrente un estado i es transitorio cuando existe la probabilidad de que no regrese a ese estado.

2.4. MIDI

La Interface Digital de Música Instrumental (MIDI, por sus siglas en inglés), es un protocolo de comunicación serial que permite a ciertos instrumentos electrónicos y computadores comunicarse entre sí. La información que fluye es de tipo musical. Hoy en día el protocolo MIDI se usa para muchas actividades de entretenimiento tales como Juegos de Video, Páginas Web, Educación Musical, etc. [18]

A diferencia de los otros formatos de sonido, MIDI se puede interpretar como una partitura digital, ya que no contiene sonido grabado de manera digital, sino información musical (tonos, tiempos, etc) que puede ser interpretada por un instrumento MIDI y tocada a través de un sintetizador. El protocolo consiste en el envío de 10 bits, 01 bit de inicio 08 bits de información y 01 bits de parada.

La información MIDI puede ser guardada en una computadora, éste es conocido como un archivo MIDI o de manera propia el Estándar de Formato MIDI (SMF por sus siglas en inglés). Existen 03 formatos SMF, los cuales se clasifican dependiendo de la cantidad de instrumentos que llevan (tracks).

- Formato 0: Posee sólo un track (una melodía)
- Formato 1: Posee más de un track, que representan una misma canción
- Formato 2: Posee más de un track, donde cada uno puede representar a una canción distinta.

Para el actual sistema se contempla recibir y generar archivos con SMF Formato 0 [19].

2.4.1. Estructura de un archivo MIDI

MIDI es un archivo del tipo secuencial y la información proveniente está organizada de la siguiente manera.

- Header Chunks
- Track Chunks
- Meta Eventos
- Mensajes

2.4.1.1. Header Chunks

Esta parte del archivo contiene información de identificación del formato MIDI y de la estructura general de la melodía, tal como su compás, el número de canales (el compositor de esta tesis sólo soporta 1), etc. su longitud es de 14 bytes.

2.4.1.2. Track Chunks

Esta sección contiene información musical de un canal en forma individual e indica el tamaño que ocupa los Eventos o Mensajes.

2.4.1.3. Meta Eventos

Aquí se encuentran la información musical correspondiente al estilo musical tal como velocidad de los tiempos musicales, el comando de finalización de la melodía, etc. Estos eventos se caracterizan porque empiezan siempre con el número 255 (0xFF)

2.4.1.4. Mensajes

Un mensaje determina qué acción se debe ejecutar y a qué canal va a afectar (por ejemplo que el instrumento guitarra toque la nota DO). Está compuesto de un comando (COMMAND BYTE) seguido uno o más datos (DATA BYTE), esta cantidad depende del comando. Para diferenciar uno del otro, todos los comandos tienen 1 en su Bit más significativo (MSB) y los datos 0. A continuación se muestra un ejemplo de la forma en que se envía un mensaje.

El Command Byte está compuesto de la siguiente manera: el MSB es 1 para su identificación, los 3 bits siguientes determinan el comando y los 04 bits restantes representan el canal hacia el cual va dirigido esa información, dependiendo del comando pueden llegar 01, 02 o 03 bytes de DATA BYTE, éstos siempre tienen su MSB en 0, para diferenciarse de los comandos. Esto se puede ver en la Figura 11.

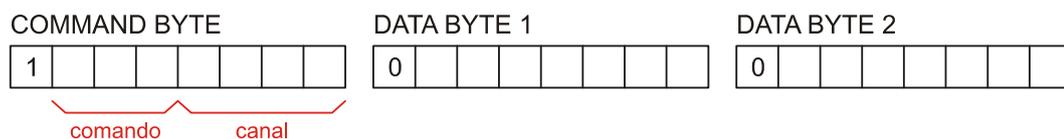


Figura 11 Estructura binaria del Protocolo MIDI

En la Tabla 2, se muestra todos los tipos de comandos y cuantos datos adicionales necesita para realizar la determinada función.

Comando	Hex.	Nro Datos	Data 1	Data 2
Note Off	8N	02	Nota	Velocidad
Note On	9N	02	Nota	velocidad
Aftertouch	AN	02	Nota	Presión
Controller	BN	02	Controlador	Valor de Controlador
Program Change	CN	01	Instrumento	-
Channel Pressure	DN	01	Presión	-
Pitch Wheel	EN	02	LSB (07 bits)	MSB (07 bits)
System Exclusive	FN	Variable	-	-

Tabla 2 Principales Comandos en el Protocolo MIDI

N: Representa los 04 bits para representar el canal al cual va dirigido el comando, desde 0 para represetar al canal 1 hasta 15 para el canal 16. Para el caso del compositor será siempre 0. A continuación se enumerará los comandos más comunes:

a. Note OFF

Indica la finalización de una nota, el primer byte de datos indica la nota que va a finalizar y el segundo la velocidad con que irá desapareciendo. Ya que los bytes de comandos tienen 7 bits, entonces se puede abarcar hasta 127 notas diferentes y hasta 127 velocidades diferentes. Las notas están identificadas con una nota, por ejemplo un DO central es representado por el número 60.

b. Note ON

Indica la inicialización de una nota, el primer byte de datos indica la nota que va a iniciar y el segundo la velocidad con que irá apareciendo.

c. Program Change

Se usa para indicar qué instrumento debe tocarse, el byte de Data indica el instrumento, Cada instrumento viene representado por un número, ya que hay 127 posibilidades, se tiene 127 instrumentos disponibles, generalmente este comando va al inicio de la secuencia.

Un conjunto de estos datos se llama mensajes, y es la manera en que el protocolo

2.5. Modelo Teórico

La composición musical automática es un sistema cuyo factor más importante para sus resultados recae en los algoritmos matemáticos usados, quienes dependiendo de su elaboración determinan el grado de similitud con una composición hecha por un artista.

Con el fin de que el sistema tenga una identidad musical, es necesario que obtenga un patrón determinado para que a partir de esa información pueda empezar su composición.

El sistema da como resultado una serie de factores a ser analizados para obtener una composición estéticamente correcta y agradable para quienes desean tener un punto de partida para obtener un estilo musical y plasmarlo en una composición elaborada.

En la Figura 12 se puede apreciar el esquema del modelo teórico.

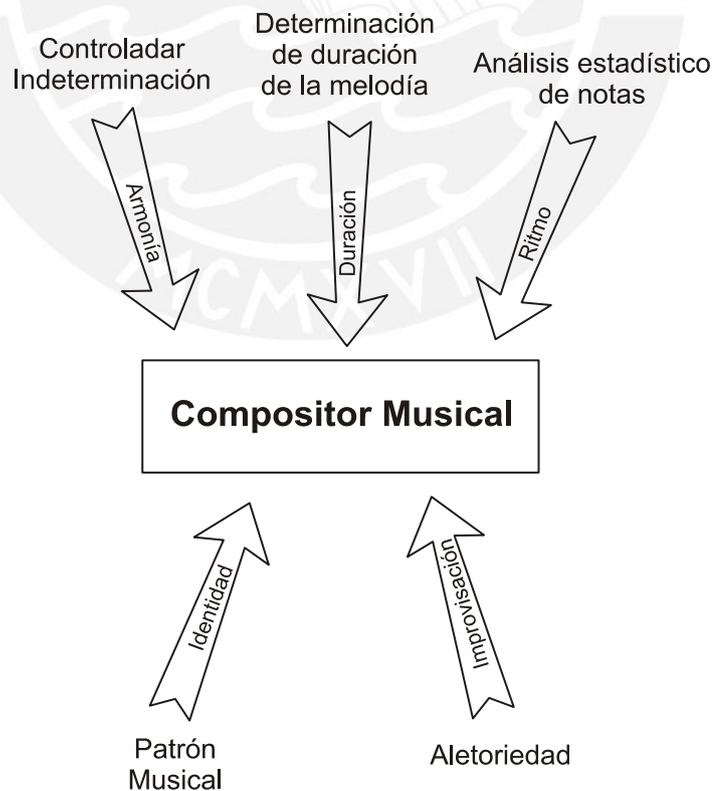


Figura 12 Modelo teórico.

2.6. Conclusiones

Existen 03 maneras de componer automáticamente, todos ellos partiendo de algoritmos matemáticos que a partir de una base de datos pregrabada, a través de un entrenamiento previo o aquellos que evolucionan su aprendizaje musical entregan una melodía que es aleatoria cada una ofreciendo diferentes estilos musicales.

Mientras más elaborada sea una composición algorítmica, deberá tener más participación por parte del usuario, lo que se traduce en una mayor complejidad en su operación.

Las cadenas de Markov tienen un comportamiento cercano a un compositor ya que obtienen un patrón musical de una composición hecha de manera elaborada, sin realizar un gran costo computacional; y permanece transparente ante el usuario.

Como se ha visto, las Cadenas de Markov usadas para el Sistema de composición musical son de 1er Orden. En el caso de incrementar el Orden de las cadenas, la probabilidad de salto dependería de más antecedentes.

El formato MIDI que es una especie de partitura musical digital que contiene las notas musicales, esto permite que al momento de su lectura no ocurran complicaciones referidas a factores externos (como error en el muestreo) que generen pérdidas de datos.

Un archivo MIDI es totalmente editable, ya que a pesar que produzca muchos sonidos a la vez, es posible separarlos eliminando así cualquier problema de interferencia o ruido de fondo, que se tuviera en otros formatos de audio.

Una generación de una melodía en MIDI ocupa un espacio en disco muy pequeño en comparación a otros formatos de audio como wav o mp3.

El formato MIDI al tratarse de una partitura musical permite la documentación de las melodías realizadas, ya que se pueden visualizar desde cualquier programa editor de partituras.

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DEL COMPOSITOR MUSICAL

La composición musical es una actividad artística que implica un alto grado de conocimiento y estilo musical además de inspiración, por lo que los compositores musicales automáticos intentan imitar esta acción aplicando algoritmos matemáticos que produzcan melodías con una determinada estructura estética pero con cierto grado de improvisación con el fin de acercarse a una composición real.

En el presente capítulo se describe en detalle el procedimiento seguido para desarrollar el compositor musical propuesto. La descripción está centrada principalmente en 04 aspectos: (i) obtención de información musical del estilo a seguir, (ii) la clasificación de esa información, (iii) generación de los algoritmos y métodos estadísticos de esa información musical por separado y (iv) unión de los parámetros musicales generados hacia una melodía resultante.

Se puede resaltar la importancia de la aplicación de Cadenas de Markov para generar de melodías de manera aleatoria, pues estas restringen algunos caminos indeterminados obteniendo como resultado un nivel de armonía más elevado.

A pesar que las Cadenas de Markov es la principal herramienta para generar las composiciones automáticas, ocurren casos que deben ser depurados con el fin de evitar situaciones que puedan ser indeseadas.

3.1. Alcances del Compositor Musical Automático

El presente estudio consta del desarrollo de un compositor musical automático que genere música aleatoria a partir de una melodía ingresada por el usuario, con el fin de obtener su estilo. Esto se consigue principalmente aplicando Cadenas de Markov. Tanto la entrada como la salida del sistema serán en formato MIDI.

El sistema contará además, con una entrada de tiempo de duración de la melodía compuesta, que es ingresada por el usuario. El desarrollo del software se realizará en MATLAB. Los alcances serán los siguientes:

- La canción ingresada debe corresponder sólo a una melodía (01 tono a la vez) a través de 01 canal (01 instrumento), caso contrario el sistema no se ejecutará.
- La melodía de entrada debe estar dentro de 03 escalas musicales (36 notas), desde un DO3 (frecuencia fundamental en 130Hz) hasta el SI5 (nota con frecuencia fundamental en 987 Hz).
- Las cadenas de Markov usadas serán finitas, estacionarias y de 1er orden.
- La canción de salida será de una melodía y 01 canal.
- El usuario deberá ingresar el tiempo (en segundos), que durará la canción.

3.2. Desarrollo del Compositor Musical

En la Figura 13, se muestra un diagrama general del Sistema, con las entradas que requiere y las salidas que produce.

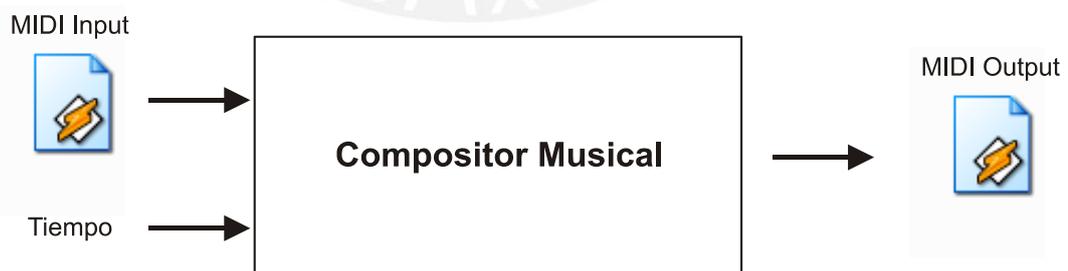


Figura 13 Diagrama General del Sistema

Dentro del Compositor musical hay 03 bloques que se encargan de realizar los algoritmos y técnicas correspondientes a la composición, según se muestra en la Figura 14 y son las siguientes:

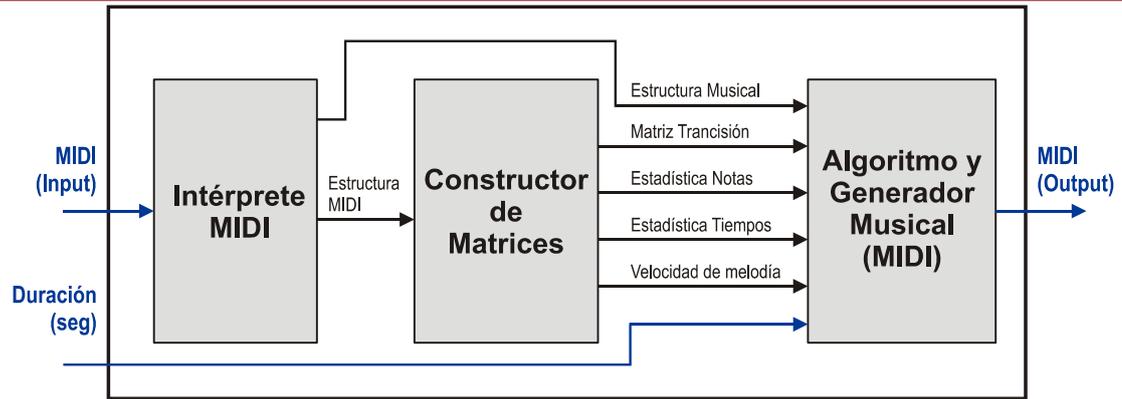


Figura 14 Diagrama del Compositor Musical

- (i) El bloque Intérprete MIDI, lee el archivo de entrada, descifra el protocolo y genera 02 salidas, una con información de cabecera del MIDI con el fin de que la melodía de salida tenga la misma estructura musical y la otra contendrá la información musical que será guardada en forma de estructura (con el fin de que sea más fácil su lectura en el siguiente bloque).
- (ii) El bloque Constructor de Matrices se encarga de generar lo siguiente:
 - 01 Matriz de 36×36 , que será la matriz de transición de salto de notas con las que se realizarán las Cadenas de Markov,
 - 01 matriz 07×01 que es una distribución de probabilidad de los tiempos de las notas musicales,
 - 01 matriz de 36×01 que es una distribución de probabilidad que se obtiene de la reiteración de las notas tocadas.
 - Información acerca del ritmo de la melodía de entrada, es decir la velocidad de los tiempos.
- (iii) Finalmente, el bloque Algoritmo y Generador Musical (MIDI) tiene la función de generar la melodía musical de salida y escribirla en formato MIDI durante el tiempo que el usuario haya ingresado.

3.2.1. Bloque Intérprete MIDI

Este bloque realiza la función de interpretar el archivo en protocolo MIDI y enviar 02 arreglos, una para el bloque Constructor de Matrices y otra para el Algoritmo y Generador Musical MIDI. En la Figura 15 se muestra un diagrama de flujo general de dicho bloque.

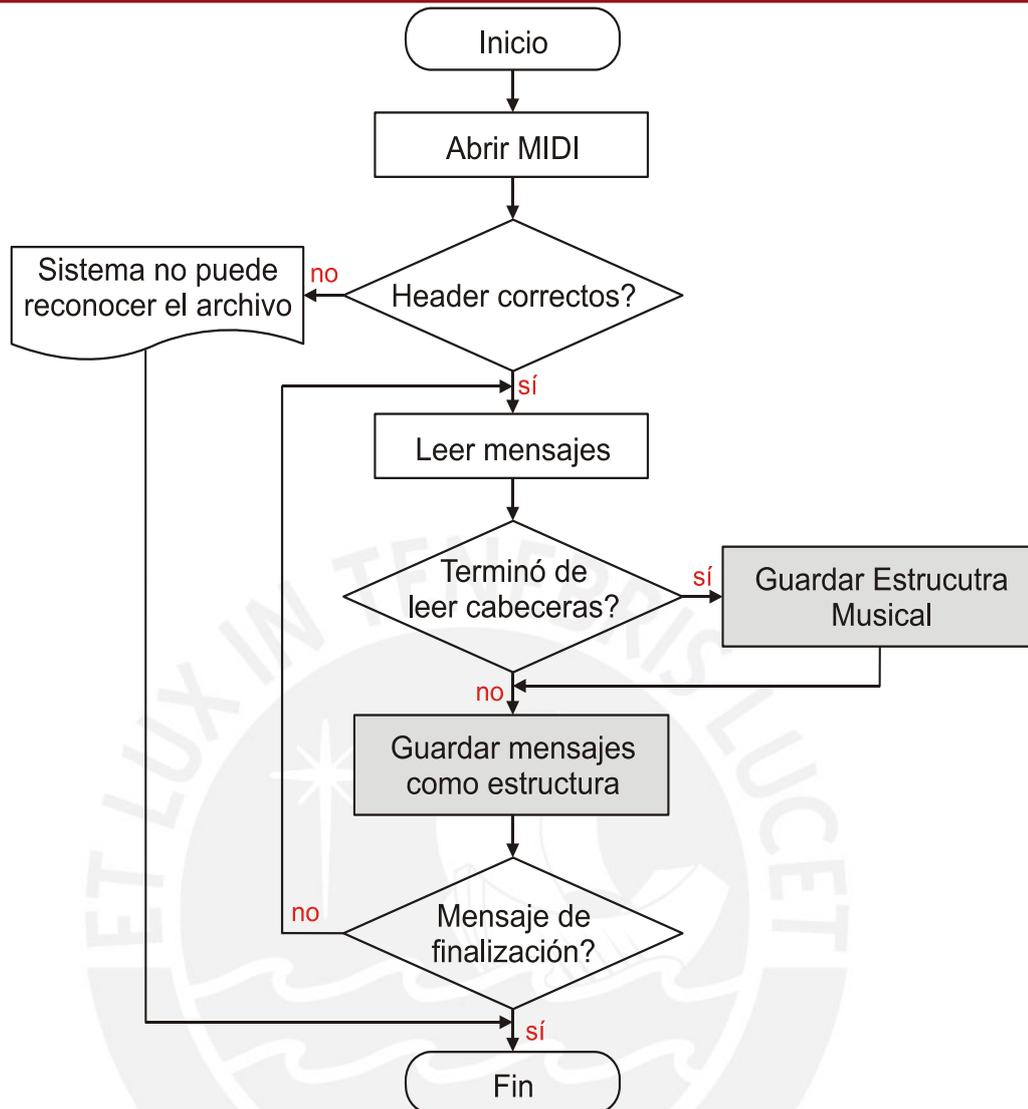


Figura 15 Diagrama de flujo del Bloque intérprete MIDI

3.2.1.1. Estructura musical

El formato MIDI contiene información musical de la melodía, como en una partitura, por lo tanto se puede obtener información de ella. Ya que el objetivo del presente estudio es mantener la estructura musical original, entonces se usa la misma para la generada. Los términos musicales que se intenta imitar son:

- el ritmo (velocidad de la melodía),
- la estructura del compás (división tiempos musicales),
- la clave musical (referencia de ubicación de notas en el pentagrama).

En la Figura 16 se hace referencia a 02 de los términos anteriormente mencionados para una mejor comprensión.



Figura 16 Componentes de una estructura musical

Esta réplica de estructura es la primera acción que realiza el compositor para obtener una composición con un estilo musical similar. Esta información viene en los primeros mensajes del MIDI, así que el programa hace una copia de esta cabecera (que va desde que comienza el MIDI hasta antes de tocar la primera nota) para almacenarla en el archivo de salida, tal como se muestra en la Figura 17.

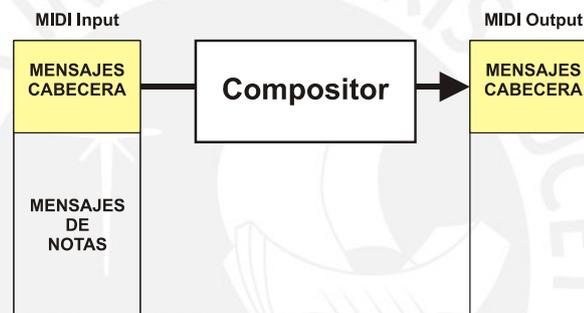


Figura 17 Diagrama del Compositor para copiar cabecera

3.2.1.2. Obtención de información musical

De toda la información musical que se puede obtener de un archivo MIDI, el presente estudio focaliza su interés en notas musicales y sus tiempos de duración.

Con el fin que el siguiente bloque pueda interpretar de manera sencilla la información musical, el bloque intérprete MIDI genera la información leída en forma de estructura, la cual está compuesta por:

- Tipo de mensaje (Command Byte)
- Duración (cuando se trate de una nota musical)
- Dato del mensaje (Data Byte)

El Tipo de mensaje (TypeMsg) indica la acción de la nota musical. Para la generación de notas musicales sólo están involucrados 02 tipos de mensajes, Nota ON y Nota OFF, que indican el inicio y el final de una nota respectivamente.

La duración de una nota musical (Duration) está presente en los comandos Nota ON (inicio) y Nota OFF (fin) de una misma nota musical. La información de la Nota Musical, está presente en el primer byte del Dato del mensaje (Data). En la Figura 18 se muestra un ejemplo de la estructura generada:

Field	Value
Duration	0
TypeMsg	144
Data	[60,127]

NOTE ON

Field	Value
Duration	960
TypeMsg	128
Data	[60,127]

NOTE OFF

Figura 18 Ejemplo del envío de la información en forma de estructura

3.2.2. Bloque Intérprete MIDI

El Constructor de Matrices entrega 03 matrices y el ritmo que decidirán el rumbo de la composición musical. En la Figura 19 se muestra un diagrama de flujo del presente bloque.

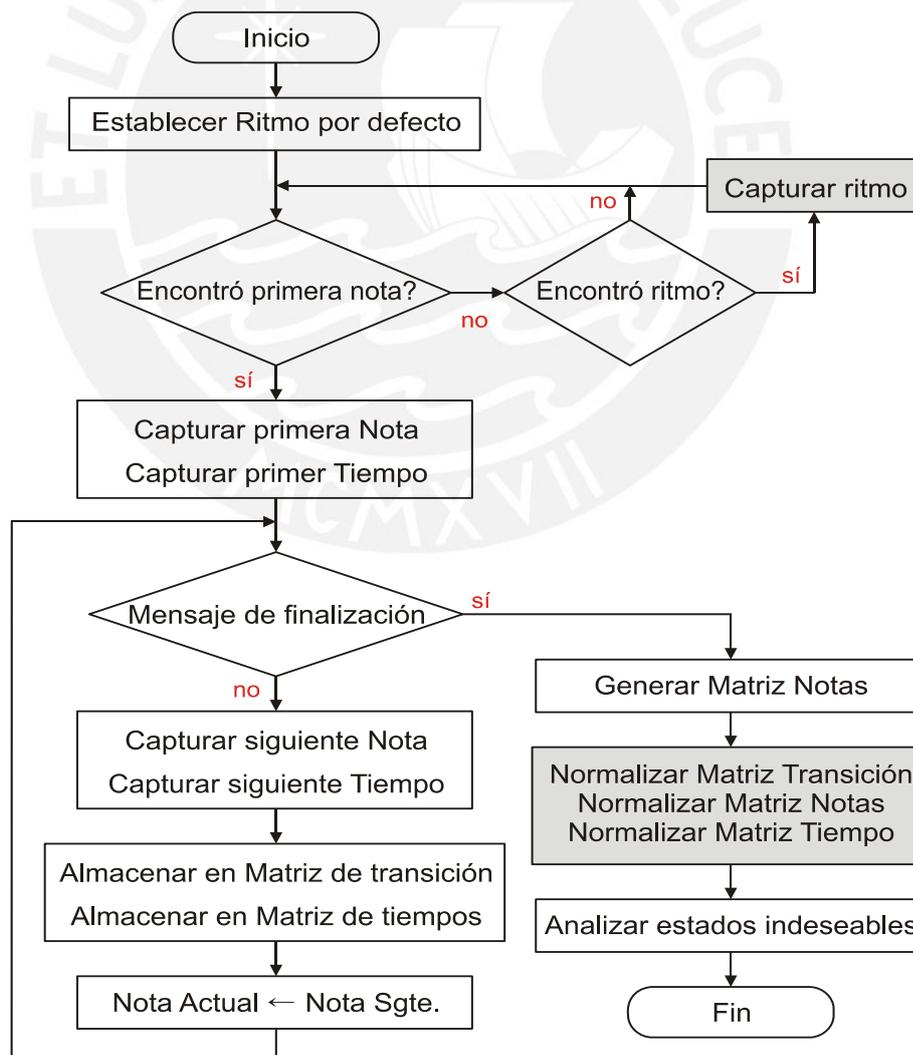


Figura 19 Diagrama de flujo de Bloque Constructor de Matrices

3.2.2.1 Matriz de Transición

Esta matriz es el motor de la generación de melodía, consta de 36 x 36 celdas, en la cual las columnas representan el estado actual y las filas el estado siguiente.

Esta Matriz se construye, contando las transiciones de notas, sin importar el tiempo que duren, para luego almacenarlas en su posición correspondiente dentro de la Matriz, donde el valor de esa transición se va acumulando a medida que una nueva transición vuelva a ocurrir.

Gracias a que las notas musicales en formato MIDI están representados por un número, éste se usa como referencia para ubicarlos dentro de la Matriz, es decir el sistema capta las notas desde un DO3 (48 en MIDI) hasta un SI5 (83), es así que a todos los valores se le resta 47 para guardarlos en la Matriz a partir de la fila y columna 1. En la Figura 20 se muestra un ejemplo de esta matriz

Nota Siguiente

	DO2	DO#2	...	SIb3	SI3
DO2	0	2	...	7	8
DO#2	1	6	...	5	10
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
SIb3	0	2	...	7	2
SI3	0	4	...	4	2

Nota Actual

Figura 20 Ejemplo de Matriz de transición

3.2.2.2 Matriz de Notas

Debido a la gran cantidad de notas que abarca el Sistema de Composición musical, se da el caso que algunas notas nunca se tocan en una melodía, así que si esas notas no fueron detectadas en la entrada, lo lógico es que tampoco se toquen en la canción compuesta. Por ello, surge la importancia de esta matriz, que calcula la frecuencia con que se tocaron las notas dentro de la melodía patrón y así obtener una estadística, resultando que la nota que se ha repetido más tenga la mayor probabilidad de ser tocada como primera nota. Esta matriz es de 36 x 1.

Para obtener esa información, se aprovecha la matriz de transición ya obtenida anteriormente, que tiene la cantidad de transiciones de notas, por lo que si a cada fila (que representa la nota actual) se le hace una suma de toda sus columnas, entonces se obtiene la cantidad de veces que se tocó esa nota. En la Figura 21 se muestra cómo se obtiene la Matriz de Notas.

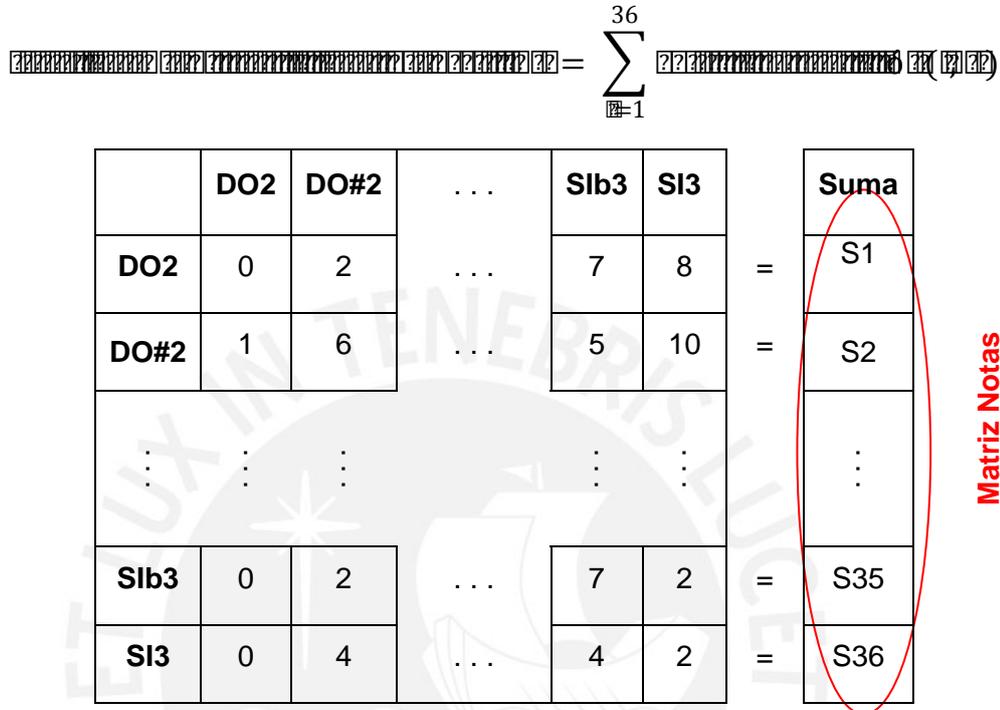


Figura 21 Ejemplo de Matriz de Notas

3.2.2.3 Matriz de Tiempos

Esta matriz se encarga de llevar una estadística que calcule los tiempos de las notas musicales en una melodía, sin importar la nota tocada. Este dato se puede obtener mediante una diferencia de tiempos que han ocurrido entre los mensajes Note ON y Note OFF, de una misma nota.

La medición de la duración de las notas musicales es en base a tiempos musicales. En la notación musical el máximo tiempo de una nota es de 4 tiempos (redonda), a partir de ahí las duraciones van reduciendo en proporción geométrica en razón de 1/2 llegando hasta la mínima duración que es de 1/16 tiempos (semi-fusa).

Es así que se forma una matriz de 01 x 07, que representan la cantidad de veces que una nota ha tenido esa duración.

En la Figura 22 se muestra una representación gráfica de la matriz de tiempos.

	semi-fusa	fusa	semi-corchea	corchea	negra	blanca	redonda
Símbolo							
Tiempos	1/16	1/8	1/4	1/2	1	2	4
Estadística	0	0	0	115	42	25	8

Figura 22 Representación de Matriz de Tiempos

3.2.2.4 Normalización de las matrices

Hasta este punto las matrices contienen datos estadísticos de la frecuencia de incidencia de notas y tiempos. Ya que la generación de la melodía es en base a algoritmos probabilísticos, la información de las matrices deben ser entregadas como distribuciones de probabilidad, por lo que hay que modificar los datos estadísticos por probabilísticos.

En el caso de la Matriz de Transición, esto se logra dividiendo a cada elemento de la matriz entre la suma de todos los elementos de la fila que lo contiene.

$$T_{ij} = \frac{M_{ij}}{\sum_{k=1}^{32} M_{ik}}$$

De manera similar se hace el mismo tratamiento, para obtener la Matriz de Notas y de Tiempos.

$$N_{ij} = \frac{M_{ij}}{\sum_{k=1}^{32} M_{ik}}$$

$$T_{ij} = \frac{M_{ij}}{\sum_{k=1}^{32} M_{ik}}$$

3.2.3. Bloque Algoritmo y Generador Musical

Este bloque genera la melodía compuesta y la escribe en formato MIDI. Para generar la secuencia sonidos que formarán la melodía compuesta, se hace uso de Cadenas Markov para obtener las notas musicales y uso de probabilidades para obtener los tiempos de cada nota. La estructura musical es la misma de la de entrada. En la Figura 23 se muestra el diagrama de flujo de este bloque.

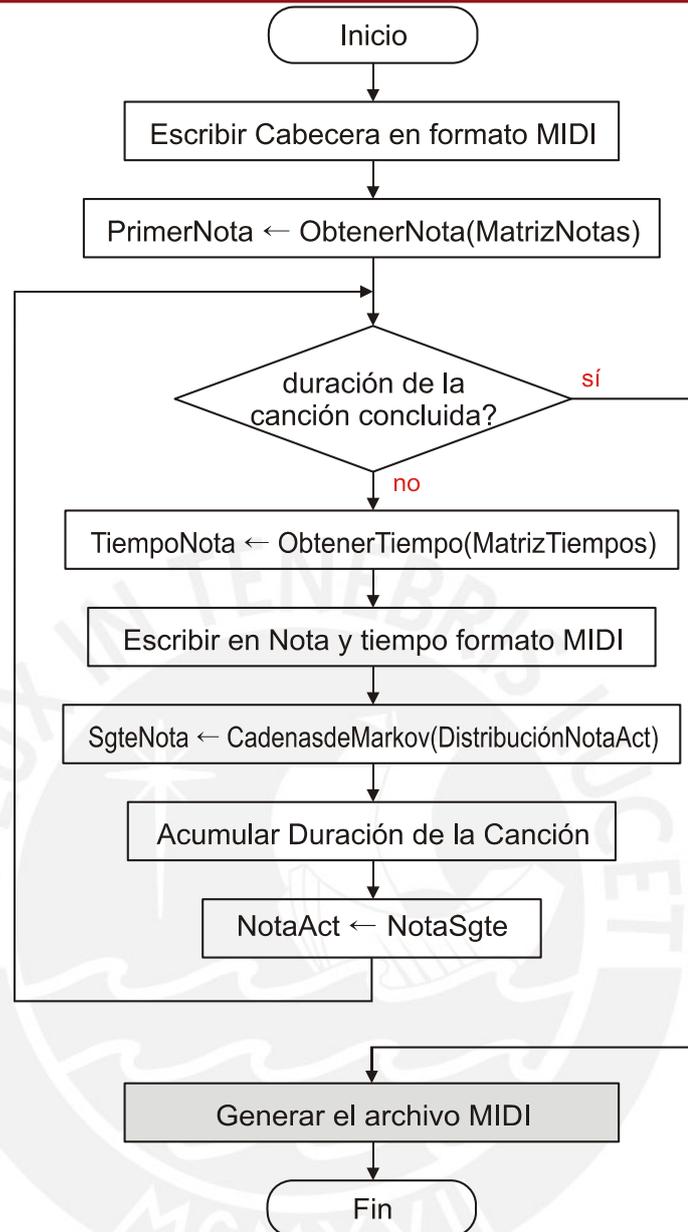


Figura 23 Diagrama de flujo de Algoritmo y Generador Musical

Como se ve las matrices son quienes dirigen el rumbo melodía a través de sus distribuciones de probabilidad. Debido a que estas distribuciones son desconocidas y distintas unas de otras, el método que se aplicó para obtener la probabilidad correcta fue la siguiente:

- Se obtiene la distribución de probabilidad que se va analizar.
- Se crean regiones para cada probabilidad, según su peso probabilístico.
- Se genera un número aleatorio entre 0 y 1 con distribución uniforme, que tiene la característica de tener la misma probabilidad en todos los puntos.
- Se escoge la probabilidad de la región en la cual el número ha caído.

Ejemplo:

Actualmente se está en la nota LA1 y usando la matriz de transición de notas se quiere obtener la siguiente nota, teniendo la distribución mostrada en la Tabla 3.

	FA1	FA#1	SOL1	SOL#1	LA1	LA#1	SI1	DO2	DO#2	RE2
LA1	0.025	0	0.35	0	0.425	0	0.1	0	0	0.1

Tabla 3 Distribución de probabilidad de Nota siguiente si estado actual es LA

A partir de la distribución de probabilidad que forma toda la fila, se crean regiones, como se muestra en la Figura 24.



Figura 24 Regiones de probabilidad

Ahora, usando la función rand(1) de MATLAB, se genera un número aleatorio entre 0 y 1 con distribución uniforme, que tiene la forma que se muestra en la Figura 25.

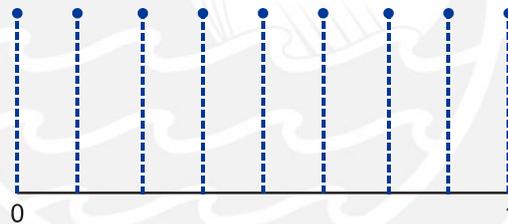


Figura 25 Distribución de probabilidad uniforme entre 0 y 1

Dependiendo del número que devuelva rand(1), se coloca dentro de la región que pertenezca, si sale 0.414, entonces se le coloca en la región correspondiente, como se muestra en la Figura 26.

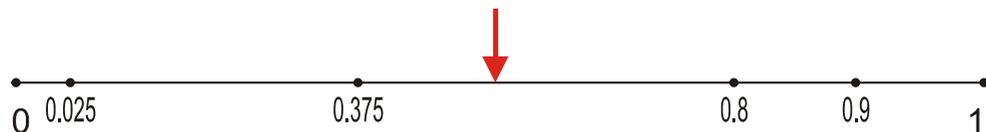


Figura 26 Método de obtención de probabilidad

Como esa región le corresponde a LA1, entonces la siguiente será LA1. Como se ve los que tienen más probabilidades son aquellos que tienen las regiones más grandes, es decir mayores probabilidades.

De la misma manera se obtienen los tiempos que duran las notas musicales, tomando como información la Matriz de tiempos y bajo este método, los tiempos de las notas que se han producido con más frecuencia serán los que tengan más probabilidades de ser escogidos, por lo tanto, si la canción patrón de entrada tiene en su mayoría notas con tiempos cortos, la misma tendencia será seguida por la canción compuesta.

3.2.3.1 Inicio de la Secuencia de Notas

Para obtener la primera nota musical se recurre a la Matriz de Notas, que tiene una distribución de probabilidad de todas las notas musicales que han sido tocadas en la melodía de entrada. Aplicando el método explicado anteriormente se obtiene la primera nota. Con esto, las notas que han sido tocadas con más frecuencia tendrán más chances de ser tocadas en la compuesta y en consecuencia las que nunca se han tocado no serán tomadas en cuenta.

3.2.3.2 Secuencia de Notas aleatorias

Una vez que se obtuvo la primera nota musical, se hacen uso de las Cadenas de Markov de 1er orden para generar la melodía compuesta. Tomando como entrada la matriz de probabilidad de transición se realiza el juego de saltos de notas, utilizando también el método de regiones probabilísticas, explicado anteriormente.

3.2.4. Cuidados en las Cadenas de Markov para la composición

Antes de realizar la secuencia de Cadenas de Markov se deberán tomar ciertas precauciones para evitar estados absorbentes o estados sin posibilidad de salto. Estos se explican a continuación:

3.2.4.1 Estados absorbentes

Esta situación puede ocurrir sólo en el caso de que las 02 últimas notas de una melodía sean las mismas y éstas no se hayan tocado antes. En la Figura 27 se muestra un ejemplo de este caso.

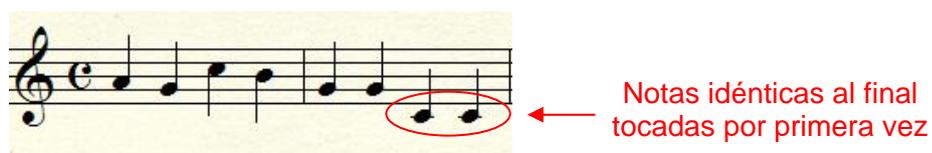


Figura 27 Melodía que ocasionaría un estado absorbente

Si esta fuera la melodía de entrada, entonces el estado Do3 sería un estado absorbente, y en caso el rumbo de la melodía llegue ahí, entonces se crearía una melodía monótona (ya que se tocaría esa nota hasta el final) y carente de algún ritmo. En la Figura 28 se muestra el diagrama de estados y en la Figura 29 la matriz de transición de esta melodía

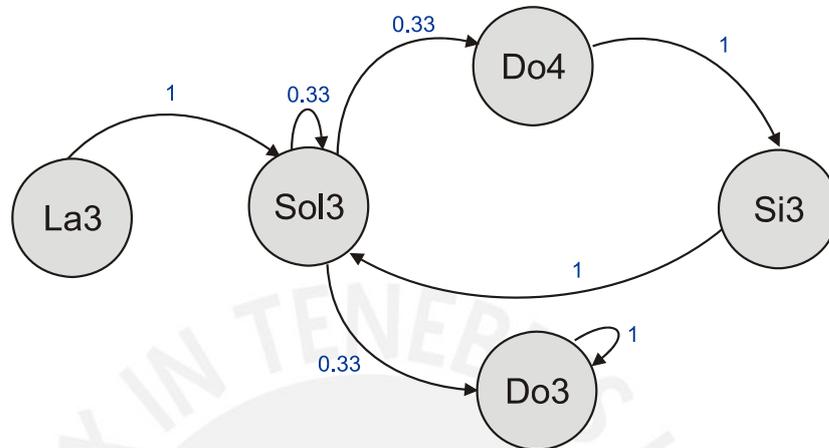


Figura 28 Diagrama de estados con 01 estado absorbente

	Do3	Sol3	La3	Si3	Do4
Do3	1	0	0	0	0
Sol3	0.33	0.33	0	0	0.33
La3	0	1	0	0	0
Si3	0	1	0	0	0
Do4	0	0	0	1	0

Figura 29 Matriz de transición con 01 estado absorbente

Para evitar estos casos, mediante software se manipula la transición, esto es preguntando si en la matriz hay algún estado absorbente (si la diagonal de la matriz principal tiene algún valor de 1). Si ocurriera este caso se pondrá a 0 este valor y también se pondrá a 0 la probabilidad de salto que nos lleva a dicho estado absorbente, en este caso $M(2,1)=0$ y luego reacomodar su distribución de probabilidad. Después de los cambios efectuados, el diagrama quedará como lo muestra la Figura 30 y Figura 31.

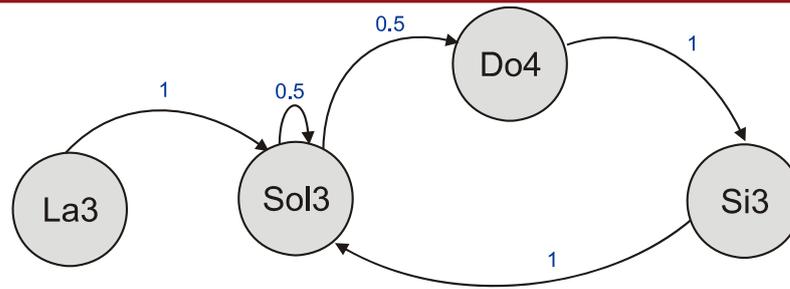


Figura 30 Diagrama de estados modificado

	Do3	Sol3	La3	Si3	Do4
Do3	0	0	0	0	0
Sol3	0	0.5	0	0	0.5
La3	0	1	0	0	0
Si3	0	1	0	0	0
Do4	0	0	0	1	0

Figura 31 Matriz de transición resultante

3.3. Duración de la Melodía

El usuario ingresa la melodía que quiere escuchar en segundos, pero el formato MIDI mide su tiempo en tiempos musicales, por lo que hay que realizar una conversión. Para ello el formato MIDI entrega un mensaje de la duración de un tiempo en microsegundos (SetTempo). Si es que no se especificara ese mensaje se asume que la nota de 01 tiempo equivale a 0.5 segundos (SetTemp=500,000). La duración de la melodía en tiempos musicales se obtiene así:

$$Duracion(tiempos\ musicales) = \frac{Duracion(seg) \times 10^6 \times TicksPerBeat}{SetTempo}$$

Donde:

TicksPerBeat : Número que representa la duración de 01 tiempo

Duracion (seg) : Duración en segundos

Duracion (tiempos musicales) : Duración en tiempos musicales

3.4. Melodía creada en formato MIDI

Una vez que se ha cumplido el tiempo de duración de la melodía compuesta se procede a escribir el archivo en formato MIDI, es decir, hacer una tarea similar al bloque Intérprete MIDI pero de manera inversa, aunque se mantiene la estructura musical de la canción de entrada. Como lo muestra la Figura 32.

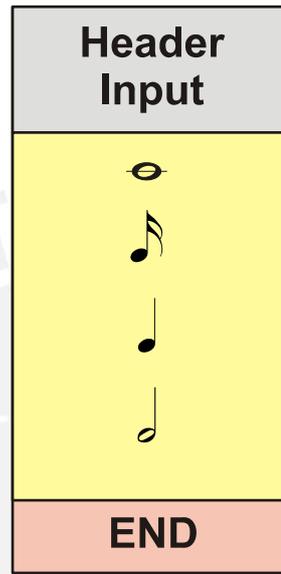


Figura 32 Guardado de Notas a Formato MIDI

3.5. Conclusiones

La estructura musical de una melodía contiene información de ritmo, distribución y referencias de notas sobre el pentagrama, ya que el sistema compositor copia esa información, entonces imita ese estilo genérico.

Los parámetros que el sistema toma para realizar una composición con estilos similar son 02: la Nota musical y su tiempo de duración.

El método de regiones probabilísticas es práctico para trabajar con una distribución probabilística desconocida, ya que permite simular su comportamiento de manera fácil e intuitiva, como es en el caso de las 03 matrices que usa el compositor musical.

Si bien es cierto que las Cadenas de Markov obtienen de manera precisa el estilo de una melodía, existen casos particulares donde se generen situaciones no deseadas, y aunque es poco probable que ocurran es necesario manipular la matriz de transición y evitar esos casos.

El sistema permite generar distintas melodías aleatorias a pesar de tener el mismo patrón musical en la entrada.

CAPÍTULO 4

EVALUACIÓN DEL COMPOSITOR MUSICAL

Los resultados de nuestro sistema musical pueden ser evaluados de manera cuantitativa y cualitativa. El análisis cualitativo es aquel en el cual las personas evalúan la calidad de la melodía generada de acuerdo a sus sensaciones y gustos, por medio de una encuesta.

De otro lado, las pruebas cuantitativas, consisten, en comparar el patrón musical de la melodía de entrada con la de salida. Principalmente a través de sus matrices de transición.

En este capítulo se describen los métodos de evaluación empleados para ambos modelos. En el plano cualitativo se obtienen resultados favorables en armonía y estilo propio de la canción generada, y a pesar de tener cierto parecido con la música de entrada se percibe una independencia en su propia elaboración.

En cuanto a los resultados cuantitativos se comparan los patrones de las melodías y se encuentran patrones similares en las múltiples pruebas realizadas. Además se mide el tiempo que tarda el software en generar una melodía y saber su carga computacional.

4.1. Descripción de Métodos empleados

4.1.1. Pruebas Cualitativas

Estas pruebas consistieron en realizar 02 encuestas, con el fin de saber la opinión de un grupo de personas acerca de la calidad musical de las canciones que resulten del compositor. Los resultados se muestran a continuación. Esta encuesta se dio sobre un universo de 40 personas.

La primera pregunta evaluó la aceptación de las melodías generadas, para ello se presentó la melodía Aleatorio.mid que se generó a partir de la melodía Yesterday.com. En la Figura 33 se muestran los resultados.

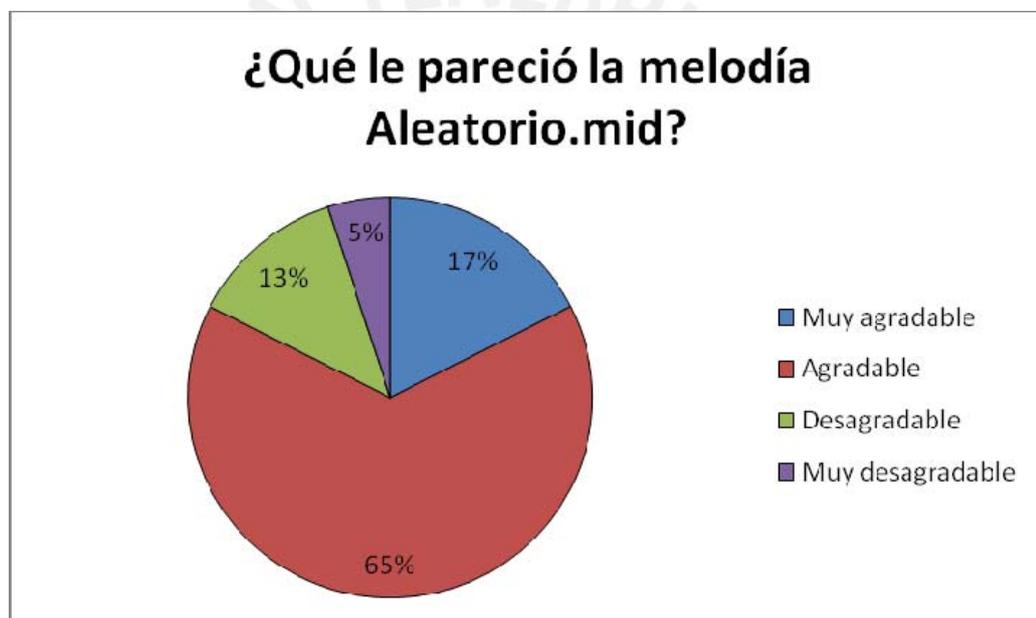


Figura 33 Porcentajes de Encuesta 1

Como se ve, la melodía resultó agradable ante el 82% de personas encuestadas, ya que a pesar de ser aleatoria adquiere la armonía que le proporcionó la melodía de entrada.

La segunda pregunta consistió en medir la similitud entre las melodías de entrada y de salida. Los resultados se muestran en la Figura 34:

¿Qué grado de similitud encuentra entre Yesterday.mid y Aleatorio.mid?

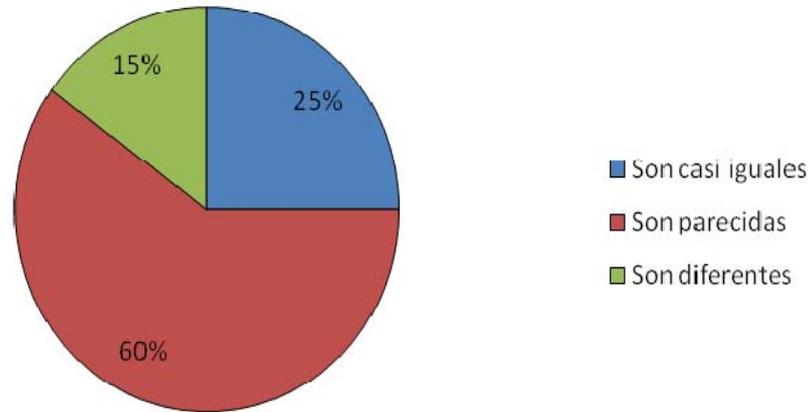


Figura 34 Porcentajes de Encuesta 2

Como se ve, se tiene la percepción de que la melodía de salida es parecida a la de entrada, pero sólo el 25% considera que son casi iguales.

Estas pruebas nos indican que el sistema realiza canciones agradables antes las personas, ya que la aleatoriedad permite obtener melodías con tonos inesperados y al mismo tiempo darle un grado de armonía debido a que su indeterminación es controlada por un patrón.

4.1.2. Pruebas Cuantitativas

Estas pruebas se realizaron comparando los patrones musicales de las melodías de entrada y de salida, comparando su matriz de transición.

Para ello se ingresó la melodía *yesterday.mid* al sistema, y se generaron 02 melodías aleatorias. Para cada canción se grabó su matriz de transición.

4.1.2.1. Matriz de transición por medio de colores.

Debido a que el compositor abarca 36 notas musicales, visualizar una matriz de 36 x 36 compuesta con números decimales, resulta poco práctico y difícil de analizar.

Es por ello que se buscó una manera más práctica de facilitar el análisis de nuestros resultados, por lo que se recurrió a la función *pcolor(X)* de MATLAB, que permite visualizar una matriz mediante colores, donde a cada celda se le asigna un

color dependiendo de su valor. Los colores se distribuyen desde azul para el mínimo valor de la matriz y rojo para el máximo. Si va acompañado con la herramienta *colorbar* se logra ver una barra con los valores correspondiente al mapa de colores.

Para nuestro caso el color azul indica una probabilidad de salto es de 0 y el color rojo, una probabilidad de salto de 1. Con ello se puede estudiar de manera más práctica el patrón musical de la melodía que estamos procesando.

En la Figura 35 se muestra el patrón original de la melodía *yesterday.mid*, y en las Figuras 36 y 37 , los patrones de melodías compuestas.

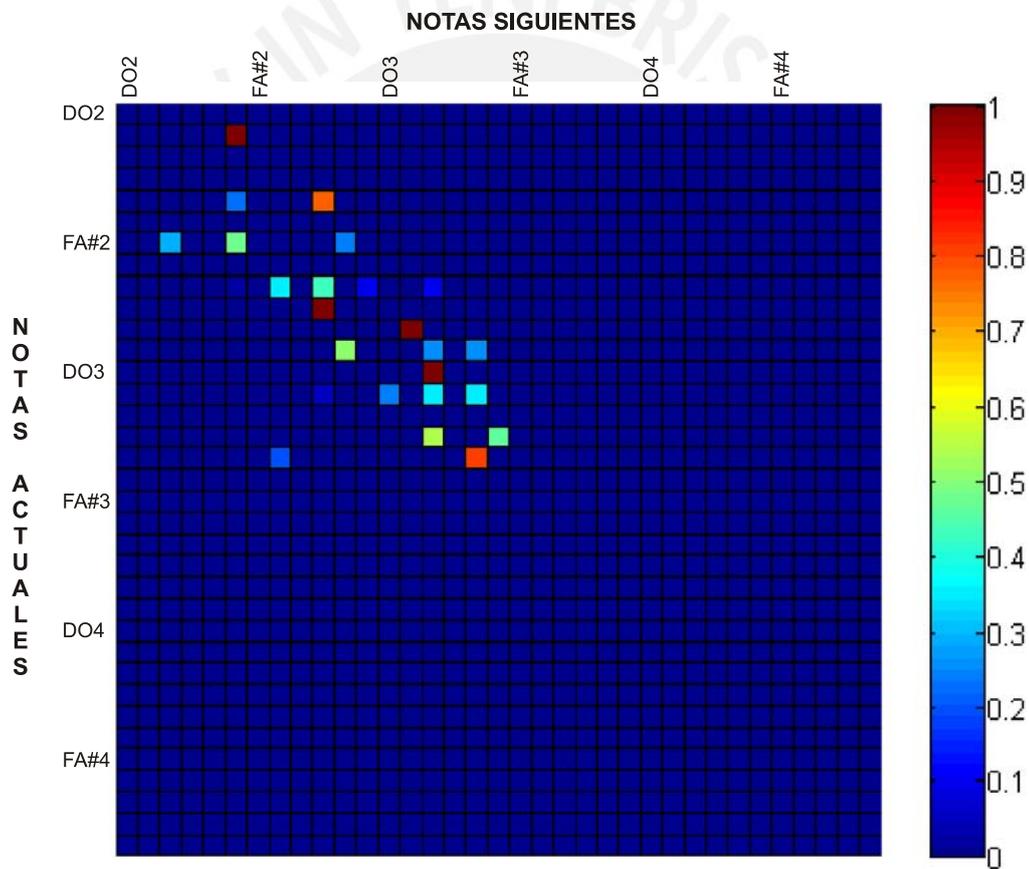


Figura 35 Patrón Musical Original

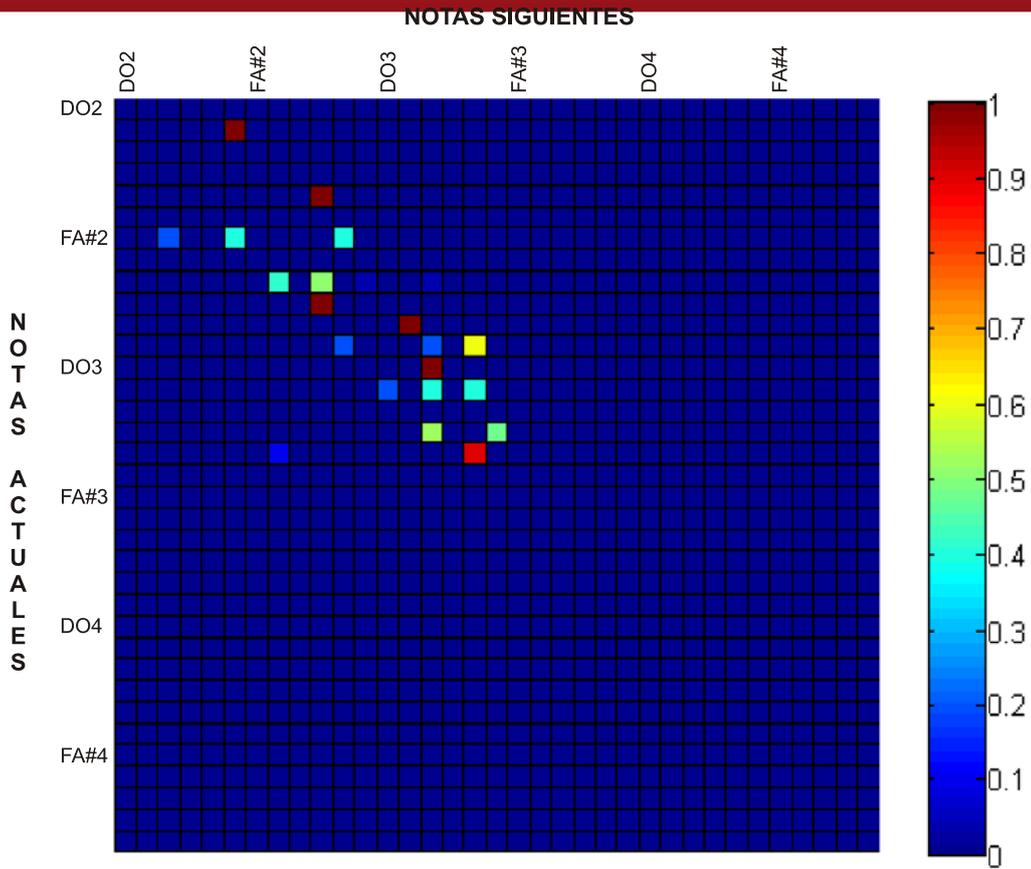


Figura 36 Patrón Musical de melodía compuesta 1

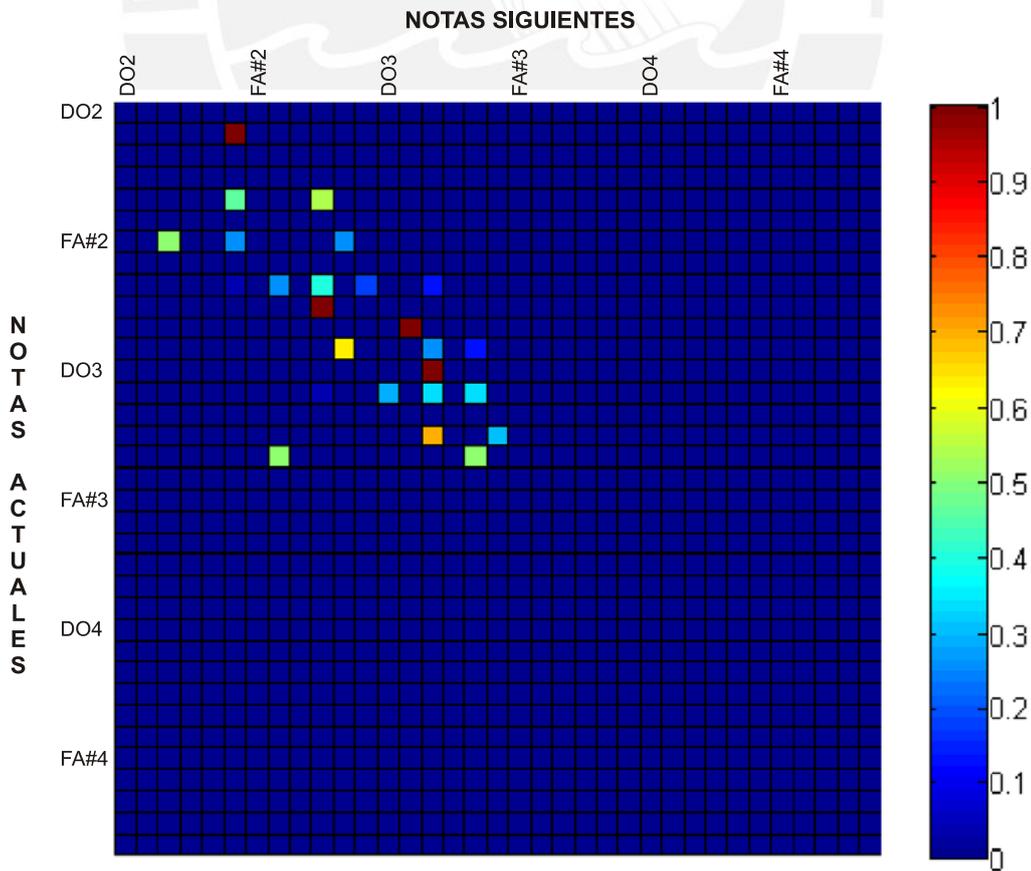


Figura 37 Patrón Musical de melodía compuesta 2

Como se puede apreciar a través de los colores, las transiciones entre las notas actuales y siguientes en la canción original y que son producto del sistema son similares. Con respecto a este resultado, se puede decir que la secuencia de notas musicales obedecerá a un patrón parecido al de la melodía, aunque con una cierta modificación en la probabilidad de salto.

Una vez visto el patrón de secuencias musicales, se va a comparar los patrones de tiempos musicales, estos se muestran en las Figuras 38, 39 y 40.

	1/16	1/8	1/4	1/2	1	2	4
Probabilidad	0	0	0	0.6053	0.2211	0.1316	0.0421

Figura 38 Probabilidad de tiempos original

	1/16	1/8	1/4	1/2	1	2	4
Probabilidad	0	0	0	0.5227	0.25	0.1477	0.0795

Figura 39 Probabilidad de tiempos de melodía compuesta 1

	1/16	1/8	1/4	1/2	1	2	4
Probabilidad	0	0	0	0.633	0.211	0.1193	0.0367

Figura 40 Probabilidad de tiempos de melodía compuesta 2

Como se ve, todas las matrices tienen una distribución de probabilidad similar a la original, esto significa que la duración de las notas variará de manera parecida.

4.1.2.2. Carga Computacional

Se realizaron pruebas usando las funciones tic-toc de MATLAB con el fin de saber lo siguiente:

- El tiempo que tarda el programa para generar las 03 matrices
- El tiempo que demora en generar una melodía.

Para esa prueba se analizaron 02 melodías, Yesterday.mid y Bach_piano.mid, con las cuales el sistema debería generar melodías aleatorias por un tiempo de 60 segundos. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4

Melodía ingresada	Entrada		Salida	
	Duración de la melodía (seg)	Procesamiento de la melodía (seg)	Duración de la melodía (seg)	Procesamiento de la melodía (seg)
Yesterday.mid	124	5.5	60	1.3
Bach_piano.mid	61	16.2	60	44.4

Tabla 4 Tabla comparativa de carga computacional entre melodías

Como se ve, a pesar que se generaron melodías con casi el mismo tiempo de duración, se obtuvieron resultados diferentes, esto se debe a que las melodías tienen un ritmo diferente, es decir en Yesterday.mid priman las notas que tienen una duración larga y en Bach_piano.mid las notas son en su mayoría cortas de tiempo. Esto se puede mostrar si observamos sus matrices de distribución de probabilidad de tiempos. Los que se encuentran en las Figuras 48 y 49.

	1/16	1/8	1/4	1/2	1	2	4
Probabilidad	0	0	0	0.6053	0.2211	0.1316	0.0421

Figura 41 Probabilidad de tiempos de Yesterday.mid

	1/16	1/8	1/4	1/2	1	2	4
Probabilidad	0.2113	0.0827	0.6989	0.0035	0.0035	0	0

Figura 42 Probabilidad de tiempos de Bach_piano.mid

A partir de ello se puede concluir que si bien es cierto que los tiempos de duración son similares, pero ya que las notas en Bach_piano.mid son más rápidas debido a que tienen más probabilidad de serlo, entonces ahí habrán más notas y demorará más su procesamiento, por lo que la comparación debe hacerse en función de la cantidad de notas tocadas y no de la duración total de la melodía.

A partir de ello se realizaron diversas pruebas en el sistema cambiando la duración de la melodía y obteniendo la cantidad de notas generadas, con estos datos se construyó la curva que se muestra en la Figura 43, donde se puede apreciar que la carga computacional se incrementa más cada vez que el sistema debe generar más notas.

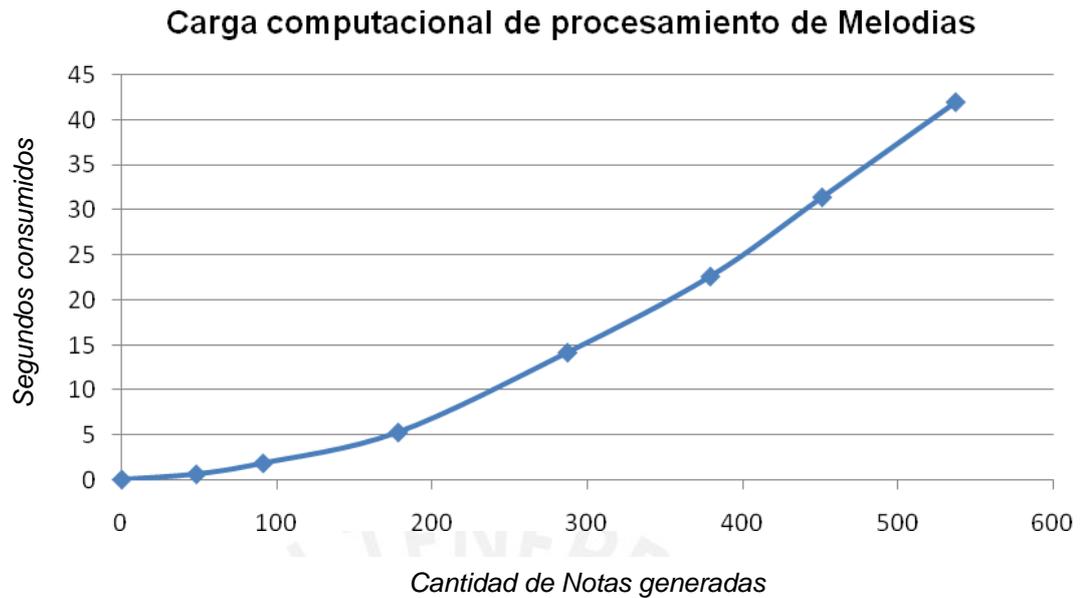


Figura 43 Carga computacional del compositor

Esto se debe a que cada vez que una nota y tiempo se generan, éstas se almacenan en una matriz la cual se concatena con la matriz anterior, ocasionando que MATLAB elimine el espacio de memoria anterior y busque un nuevo espacio más grande para guardar la matriz actual. Es por ello que mientras más dura la canción, hay más concatenaciones y más espacio es necesitado de memoria.

4.2. Documentación de melodías

Una vez que el sistema genera melodías éstas pueden ser escuchadas por el usuario, además, en el caso que éste requiera conocer qué notas están siendo tocadas las puede visualizar a través de algún software editor de partituras, ya que como se dijo, el formato MIDI almacena las notas musicales.

Con el fin de comprobar esta ventaja, se procedió a abrir el archivo Aleatorio.mid (archivo generado por el sistema) en el software para edición de partituras MagicScore Maestro 6 [20]. Su modo de evaluación está disponible de forma gratuita y funciona sobre Sistema Operativo Windows. Las partituras de las melodías de entrada y de salida se muestran en el Anexo 3.

4.3. Conclusiones

Para evaluar esta tesis se realizaron pruebas cualitativas para medir el grado de aceptación de las melodías generadas ante las personas, quienes opinaron que estas melodías son armoniosas y a pesar de tener cierta similitud con la entrada, poseen una identidad propia.

Se realizaron pruebas cuantitativas con el fin de analizar el patrón musical de las diversas melodías generadas, viendo tanto su transición de notas como su matriz de probabilidad de tiempos. Esos resultados mostraron similitud en ambos campos, generando que la melodía obtenga el estilo y ritmo de la melodía de entrada.

La carga computacional en la generación de la melodía no se debe medir con respecto a la duración de la misma en segundos sino en cantidad de notas generadas por segundo, ya que no es lo mismo generar cuatro notas de un tiempo que una de cuatro tiempos.

La carga computacional no crece de manera lineal, debido a que mientras más larga sea su duración se concatenarán más matrices provocando que el Software gestione una asignación de memoria cada vez más grande.

Las melodías compuestas por el sistema no solo pueden ser escuchadas, sino que también pueden ser están documentadas ya que éstas pueden visualizarse en cualquier software editor de partituras, lo que permite un mejor análisis a la melodía resultante.

CONCLUSIONES

1. Debido a los diversos campos donde ha ingresado, tales como el tratamiento de la salud, la música ha tomado un papel trascendental dentro de nuestra sociedad.
2. A pesar de su popularidad, el conocimiento musical es abarcado sólo por un grupo pequeño de personas, además esto se profundiza ya que la educación musical no es prioridad en las escuelas de algunos países como el Perú.
3. Desde la antigüedad se han usado a las matemáticas como nexo para entender a la música, sobretodo haciendo uso de modelos aleatorios.
4. Debido a que las personas tienen una preferencia del 65% de su tiempo libre a escuchar música, muestra una gran afinidad entre los individuos y las melodías.
5. La falta de atención a un usuario sin cultura musical pero con deseo de participar de forma activa, indica que existe un mercado de grandes dimensiones.
6. Hay 03 formas de realizar música de forma automática, a partir de una base de datos pregrabada, a partir de un entrenamiento previo o a partir de una evolución en su aprendizaje, cada una mostrando una identidad determinada.
7. Mientras más funciones tenga un sistema de composición automática, implica de un conocimiento mayor del usuario, por lo que es más compleja su operación.

8. Con las cadenas de Markov generan melodías que podrían ser compuestas por alguien debido a que pueden adquirir de manera eficiente un patrón musical de otra composición, además su desarrollo en software se hace de manera intuitiva y con una programación en serie.
9. El formato MIDI es una especie de partitura musical digital que contiene las notas musicales, esto permite que no ocurran al momento de su lectura complicaciones referidas a factores externos (como error en el muestreo) que puedan generar pérdidas de datos.
10. Un archivo MIDI es totalmente editable, ya que a pesar que produzca muchos sonidos a la vez, es posible separarlos eliminando así cualquier problema de interferencia o ruido de fondo, que se tuviera en otros formatos de audio.
11. Una generación de una melodía en MIDI ocupa un espacio en disco muy pequeño en comparación a otros formatos de audio como wav o mp3.
12. La estructura musical de una melodía contiene información de ritmo, estructura y referencias de notas sobre el pentagrama, es decir, datos acerca del estilo propio de una canción, con el fin de imitar este estilo común, el sistema compositor copia esa información.
13. Hay varios parámetros que identifican el estilo de una melodía, esta información se encuentra en el formato MIDI de la misma, el sistema se enfoca en 02 de ellos para su elaboración musical, estos son la Nota musical y su tiempo de duración.
14. El método de regiones probabilísticas es muy útil cuando se quiere obtener una distribución probabilística desconocida, ya que permite simular su comportamiento de manera sencilla, como es en el caso de las 03 matrices que usa el compositor musical.
15. Si bien es cierto que las Cadenas de Markov logran obtener el estilo de una melodía, existen casos particulares donde se generan situaciones no deseadas, y aunque es poco probable que ocurran es necesario manipular la matriz de transición y evitar esos casos.

16. Este sistema puede generar diferentes melodías aleatorias entre sí incluso si comparten el mismo patrón en la entrada.
17. Las pruebas cualitativas del presente trabajo mostraron aceptación de las melodías generadas, debido a que en su opinión éstas son armoniosas y a pesar de tener cierta similitud con la entrada, poseen una identidad propia.
18. Se realizaron pruebas cuantitativas con el fin de analizar el patrón musical de las diversas melodías generadas, viendo tanto su transición de notas como su matriz de probabilidad de tiempos. Esos resultados mostraron similitud en ambos campos, generando que la melodía obtenga el estilo y ritmo de la melodía de entrada.
19. Para resultados acerca de la carga computacional en la generación de la melodía, no se ha medido en la duración de la melodía sino en cantidad notas generadas por segundo ya que por ejemplo generar 04 notas de 01 tiempos tarda más que una nota de 04 tiempos.
20. Las melodías compuestas por el sistema no solo pueden ser escuchadas, sino que también pueden ser están documentadas ya que éstas pueden visualizarse en cualquier software editor de partituras, lo que permite un mejor análisis a la melodía resultante.

RECOMENDACIONES

1. Con el fin de que la generación de melodías tenga un mayor grado de armonía, se puede generar música considerando Cadenas de Markov de un orden mayor, aunque en contraste, la composición tendrá más similitud con respecto a la entrada.
2. Una manera de aumentar el grado autenticidad de la melodía compuesta es a través de la generación de melodías a partir de varios patrones musicales, pero antes estos deben tener patrones similares con el fin de mantener controlada la indeterminación, en caso contrario la composición perderá armonía.
3. Se puede generar una melodía a partir de 02 de entrada, una suministrando su matriz de transición de notas y otra aportando su matriz de tiempos, con lo cual se tendría una composición con mayor identidad.
4. Con un mayor conocimiento musical en armonía, usando el mismo patrón de transición de notas, se puede producir varios sonidos a la vez, relacionando adecuadamente las notas obtenidas.
5. Para disminuir la carga computacional del sistema, realizar un asignamiento de memoria predictivo, con el fin de evitar la múltiple concatenación de matrices y al final realizar sólo un pequeño ajuste de tamaños de memoria.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Programa de Terapia Musical de la Facultad Boyer College of Music and Dance” de la Universidad de Temple
<http://www.temple.edu/musictherapy/home/program/faq.htm>
- [2] Jon McCormack, Grammar Based Music Composition, Computer Science Department, Monash University, pp. 2.
- [3] Violeta Hemsy de Gainza, Problemática Actual y perspectivas de la Educación Musical para el siglo XXI, Pontificia Universidad Católica del Perú, pp 6, 2000.
- [4] Susana Tiburcio Solís, Teoría de la Probabilidad en la Composición Musical Contemporánea, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Escuela de Artes, pp 9.
- [5] Susana Tiburcio Solís, Teoría de la Probabilidad en la Composición Musical Contemporánea, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Escuela de Artes, pp 12
- [6] Reunión: John Cage, Marcel Duchamp, Música Electrónica y Ajedrez
<http://www.uclm.es/artesonoro/olobo2/Reuni%97n/reuni%97n.html>
- [7] DownTown Music Gallery
http://search2.downtownmusicgallery.com/lookup.cgi?item=2005_07_06_16_21_53
- [8] Calvi, Juan C., La industria de la música, las nuevas tecnologías digitales e Internet. Algunas transformaciones y salto en la concentración, Zer. Revista de Estudios de Comunicación, vol. 11, nº 21, 2006, pp. 122-137
- [9] El entretenimiento bajo todas sus formas, que sean valoradas por el cliente, se incorpora cada vez con más fuerza al retail
Ph.D Ruben Roberto Rico

- [10] José María Benito García, El mercado de los videojuegos. Unas cifras, Revista Icono 14, nº 7, pp 7, 2006
[http://www.icono14.net/revista/num7/articulos/Jose Maria Benito.pdf](http://www.icono14.net/revista/num7/articulos/Jose%20Maria%20Benito.pdf)
- [11] Espí D., Ponce de León P.J., Pérez-Sancho C., Rizo D., Iñesta J.M., Moreno-Seco F., Pertusa A., A cooperative approach to style-oriented music composition, Proc. of the Int. Workshop on Artificial Intelligence and Music, MUSIC-AI, pp. 2, 2007.
- [12] Todd, P., Werner, G.: Frankensteinian methods for evolutionary music composition. MIT press/Bradford books, pp 2, 1998
- [13] Todd, P., Werner, G.: Frankensteinian methods for evolutionary music composition. MIT press/Bradford books, pp 3, 1998
- [14] Página de Commun Music
<http://commonmusic.sourceforge.net/cm/res/doc/cm.html#introduction>
- [15] Página de Commun Music en Sourceforge
http://sourceforge.net/project/screenshots.php?group_id=9766&ssid=103640
- [16] Susana Tiburcio Solís, Teoría de la Probabilidad en la Composición Musical Contemporánea, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Escuela de Artes, pp 21.
- [17] Norris, J. R. Markov chains. Cambridge Series in Statistical and Probabilistic Mathematics. Cambridge University Press, Cambridge, 1998.
- [18] Paul Messick, Maximum MIDI: Music Application in C++, Prentice Hall, pp 2-10, 1999.
- [19] Paul Messick, Maximum MIDI: Music Application in C++, Prentice Hall, pp 187-200, 1999.
- [20] Software MagicScore Maestro 6
<http://magicscore-maestro.softonic.com/>