

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES
FACULTAD DE CIENCIAS PURAS Y NATURALES
CARRERA DE INFORMATICA



TESIS DE GRADO

**“MODELO DE CADENA DE MARKOV EN LA COMPOSICION DE
UN FRAGMENTO MUSICAL MONOFONICO”**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE LICENCIATURA EN INFORMÁTICA

MENCIÓN: INGENIERÍA DE SISTEMAS INFORMÁTICOS

POSTULANTE: Univ. Christian Cuéllar Ramírez

TUTORA METODOLOGICA: M. Sc. Elizabeth García Escalante

ASESOR: Ing. César Beltrán Villalta

LA PAZ – BOLIVIA

2015



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE CIENCIAS PURAS Y NATURALES
CARRERA DE INFORMÁTICA**



LA CARRERA DE INFORMÁTICA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS PURAS Y NATURALES PERTENECIENTE A LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.

LICENCIA DE USO

El usuario está autorizado a:

- a) visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la referencia correspondiente respetando normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADOS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.

Dedicatoria

*Principalmente a Dios.
Por darme la vida,
por ser mi guía, escudo y fortaleza.
En cada aspecto de mi vida, veo Tú amor y Tú fidelidad Señor.
"Te amo, oh Jehová, fortaleza mía" Salmos 18:1*

*A mis padres.
Por su apoyo, comprensión y amor incondicional.
Por cuidarme, enseñarme y guiarme en la vida.
Por estar siempre a mi lado cuando los necesito
y por infundir en mí el amor a la música.*

*A mi abuelito.
Fuiste un gran ejemplo.
La bondad y el amor a los demás fueron tu virtud.
Dejaste grabadas en mí, tus enseñanzas y tu sabiduría.
Te extraño mucho, pero sé que algún día nos volveremos a encontrar.*

Agradecimientos

A la M.sc. Elizabeth García Escalante, por el constante apoyo, guía, consejo y tiempo dedicado en la estructuración y desarrollo de la presente investigación.

Al Ing. César Beltrán Villalta por el apoyo, comprensión y el tiempo dedicado a la revisión y corrección del diseño de la presente investigación.

A mi familia, mis padres Víctor y Bertha, mi tío Jaime, mis hermanos Juan Víctor y Patricia por su amor, cariño y paciencia.

A Paola por su oportuno y eficaz consejo, comprensión y gran apoyo.

A mis amigos de la Congregación Vida Nueva, por su comprensión y apoyo en este tiempo.

A mis amigos y compañeros de la carrera de Informática, con los que compartí grandes e inolvidables momentos.

A la maestra Emma Junaro, por su amistad, comprensión y valioso aporte en la investigación.

A los docentes de la carrera de informática, por el esfuerzo, empeño y dedicación que ponen en nosotros, con el fin de formarnos como excelentes profesionales.

A todos, muchas gracias.

Christian Cuéllar Ramírez

RESUMEN

La música, es una cualidad esencial del ser humano, es una expresión de creatividad e ingenio y sobre todo algo que nace en lo más profundo de su ser. Como tal, la música es algo que nunca se lograra entender completamente, sin embargo es fascinante analizar y estructurar los procesos que se llevan a cabo en un ser humano cuando el oye, siente, experimenta, pero en esta investigación en particular cuando crea música. Imitar la lógica, razonamiento y proceso creativo de un músico cuando está componiendo una melodía musical, es un tema de estudio innegablemente interesante y apasionante.

Es por todo esto que el presente trabajo de investigación se basa principalmente en la aplicación del modelo de cadenas de Markov, para la composición de fragmentos musicales monofónicos. Estos fragmentos, para ser generados dependen de canciones, melodías o fragmentos musicales ya existentes de los cuales se extraen patrones musicales para formar matrices de transición de estados que controlan, dirigen y establecen las adecuadas transiciones entre una nota y otra, permitiendo en base a ello componer fragmentos musicales que poseen cierta calidad, cierto estilo definido según los patrones musicales y que son agradables al escucharse.

Para el modelado del prototipo y cumplimiento de los objetivos planteados, se utiliza el modelo de desarrollo en Cascada combinado con diagramas del Lenguaje Unificado de Modelado (UML), y para la construcción e implementación del mismo se recurrió a herramientas como Java y la librería JMusic.

Durante la investigación se analizan, estructuran y presentan: los aspectos generales, aspectos teóricos y componentes del proceso, para finalmente aplicar estos conocimientos en un prototipo funcional donde la creatividad humana es transformada en creatividad artificial.

Palabras clave: Cadenas de Markov, música, composición de fragmentos musicales.

ABSTRACT

Music is an essential quality of human beings, it is an expression of creativity and ingenuity and especially something born in the depths of his being. As such, music is something that never managed to fully understand, but it is fascinating to analyze and structure the processes taking place in a human being when hear, feel, experience, but in this particular research when creating music. Imitate logic, reasoning and creative process of a musician when composing a musical melody, it is a subject of study undeniably interesting and exciting.

It is by this that the present research is mainly based on the application of a Markov chain model for the composition of monophonic musical fragments. These fragments to be generated depend on songs, melodies or musical fragments existing musical patterns which are extracted to form state transition matrices that control, manage and provide the appropriate existing transitions from one note to another, enabling based on this compose musical pieces have a certain quality, a style defined by the musical patterns that are pleasing to hear.

Prototype for modeling and compliance objectives, the waterfall development model combined with diagrams of the Unified Modeling Language (UML) is used, and the construction and implementation of the resorted to tools such as Java and the library JMusic.

During the investigation they are analyzed, structured and presented: general aspects, theoretical aspects and components of the process to eventually apply this knowledge in a working prototype where human creativity is transformed into artificial creativity.

Keywords: Markov chains, music, composition of musical melodies.

INDICE GENERAL

- Dedicatoria
- Agradecimientos
- Resumen
- Abstract
- Introducción

Capítulo 1: Marco Preliminar	1
Capítulo 2: Marco Teórico	13
Capítulo 3: Ingeniería del Prototipo.....	43
Capítulo 4: Marco de Conclusiones	82
Referencias.....	88
Anexos.....	91

INDICE ESPECIFICO

- Dedicatoria
- Agradecimientos
- Resumen
- Abstract
- Introducción

Capítulo 1: Marco Preliminar	1
1.1 Estado del arte	1
1.2 Método y tipo de investigación.....	7
1.3 Planteamiento del problema	7
1.4 Formulación del problema de investigación.....	9
1.5 Planteamiento de objetivos e hipótesis.....	9
1.5.1 Objetivo General.....	9
1.5.2 Objetivos Específicos	10
1.5.3 Hipótesis	10
1.6 Justificación.....	10
1.6.1 Académica	10
1.6.2 Social	11

1.6.3	Práctica	11
1.6.4	Económica	11
1.7	Alcance.....	12
1.7.1	Temporal.....	12
1.7.2	Espacial	12
Capítulo 2: Marco Teórico		13
2.1	La música	15
2.1.1	Origen de la música.....	15
2.1.2	Notación y teoría musical	17
2.1.3	El Ritmo	22
2.1.1	La Melodía	24
2.1.2	Armonía	26
2.2	Composición musical de melodías.....	27
2.3	Reconocimiento de patrones musicales	31
2.4	Cadena de Markov	33
2.4.1	Cadena homogénea.....	34
2.4.2	Probabilidades de transición y Matriz de transición	34
2.4.3	Propiedades y clasificación de estados en una cadena markoviana	35
2.4.4	Tipos de cadenas	36
2.4.5	Probabilidades de estado estable	38
2.5	Metodologías	39
2.5.1	Modelo en cascada	39
2.5.2	Metodología de redacción de encuestas	41
Capítulo 3: Ingeniería del Prototipo.....		43
3.1	Descripción del proceso para crear fragmentos musicales monofónicos.	43
3.2	Modelo de Cadena de Markov aplicable a la composición de fragmentos musicales monofónicos.....	47
3.2.1	Extracción de patrones y repositorio musical.....	48
3.2.2	Generación de matriz y diagrama de transición de estados.....	50
3.2.3	Síntesis del proceso de Markov para componer un fragmento musical.....	56
3.3	Modelo de desarrollo del prototipo.....	60
3.3.1	Fase de análisis de los requisitos	60
3.3.1.1	Objetivo	60

3.3.1.2	Requerimientos.....	60
3.3.1.3	Actores y sus relaciones.....	61
3.3.1.4	Casos de Uso	61
3.3.1.5	Descripción de los casos de uso	62
3.3.1.6	Diagrama de secuencia de los casos de uso.....	63
3.3.1.7	Diagrama de clases de los casos de uso.....	63
3.3.2	Fase de diseño	64
3.3.2.1	Diagrama de actividades	64
3.3.2.2	Diagrama de componentes del proyecto.....	65
3.3.2.3	Diseño del generador de matriz de transición de estados.....	66
3.3.2.4	Diseño del generador de frase melódica.....	67
3.3.2.5	Diseño del método para asignar características musicales	68
3.3.3	Fase de codificación.....	68
3.3.3.1	Código del método para generar la matriz transición de estados.....	69
3.3.3.2	Código para generar frase melódica	70
3.3.3.3	Código para generar fragmento musical monofónico	71
3.3.3.4	Diseño del prototipo	72
3.3.3.5	Herramienta empleada (Librería JMusic)	74
3.3.4	Fase de prueba, validación y evaluación global de los resultados.....	77
3.3.4.1	Prueba y validación del prototipo	77
Capítulo 4:	Marco de conclusiones	82
4.1	Conclusiones generales.....	82
4.1.1	Estado del cumplimiento de los objetivos	84
4.1.2	Estado de cumplimiento de hipótesis.....	85
4.2	Recomendaciones.....	86
4.3	Trabajos futuros.....	86
Referencias.....		88
Anexos.....		91
Anexo A.....		91
Anexo B.....		92
Anexo C		95
Anexo D		97

INDICE DE ALGORITMOS

Algoritmo 1: Generador de matriz de transición de estados.....	69
Algoritmo 2: Generador de frase melódica.....	70
Algoritmo 3: Asignación de características a frase melódica.....	72

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama del sistema Saxex	2
Figura 2: Aspecto de HAILE	4
Figura 3: El ordenador IAMUS (derecha).....	6
Figura 4: Armaduras.....	18
Figura 5: Simbología del Compas	19
Figura 6: Signos de las claves	19
Figura 7: Índices de altura de las notas	21
Figura 8: Valores de tempo	22
Figura 9: Ejemplo de ritmo de valores.....	23
Figura 10: Ejemplo de ritmo melódico.....	23
Figura 11: Ejemplo de ritmo dinámico.....	23
Figura 12: Ejemplo de ritmo armónico	24
Figura 13: Línea melódica sin ritmo (sucesión de notas)	25
Figura 14: Línea melódica con ritmo	25
Figura 15: Etiquetado de notas, fragmento “Oh Susanna”	32
Figura 16: Histograma de notas	33
Figura 17: Matriz de transición en un paso	35
Figura 18: Matriz de transición de N pasos.....	35
Figura 19: Matriz de transición de cadenas absorbentes	38
Figura 20: Actividades del modelo en cascada.....	40
Figura 21: Escala de D menor pentatónica	45
Figura 22: Compas de cuatro cuartos	45
Figura 23: Nota D con 2 tiempos de duración.....	46
Figura 24: Nota F con medio tiempo de duración (derecha)	46
Figura 25: Melodía básica de blues	47
Figura 26: Fragmento musical de la melodía “Un elefante se balanceaba”	50
Figura 27: Diagrama de transición de estados de “Un elefante se balanceaba”	54
Figura 28: Fragmento melódico generado por el ejemplo	59
Figura 29: Actores del sistema y sus relaciones.....	61
Figura 30: Casos de uso del proyecto.....	62
Figura 31: Diagrama de secuencia de Usuario.....	63
Figura 32: Diagrama de clases	64
Figura 33: Diagrama de actividades.....	65
Figura 34: Diagrama de componentes del sistema	66
Figura 35: Esquema del modelo Generador de matriz de transición de estados.....	66

Figura 36: Esquema de modelo para el generador de frase melódica.....	67
Figura 37: Esquema de modelo para asignación de características musicales.....	68
Figura 38: Interfaz gráfica del prototipo.....	73
Figura 39: Interfaz gráfica en funcionamiento con ventana de partitura	74
Figura 40: Conocimiento musical y composición	78
Figura 41: Facilidad de uso	79
Figura 42: Fiabilidad de uso	79
Figura 43: Predisposición de uso de la tecnología propuesta	80
Figura 44: Disponibilidad de productos similares en el mercado	80
Figura 45: Nivel de aceptación de la escritura en las partituras	81
Figura 46: Nivel de aceptación y agrado de la melodía.....	81

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Figuras y Silencios Musicales	17
Tabla 2: Símbolos de las Alteraciones.....	18
Tabla 3: Cifrado anglosajón o americano	19
Tabla 4: Valores de intensidad musical.....	21
Tabla 5: Cantidad de repeticiones por nota	32
Tabla 6: Función de densidad del fragmento melódico	33
Tabla 7: Características, ventajas y desventajas del modelo en cascada	41
Tabla 8: Función de densidad del fragmento de "Un elefante se balanceaba"	51
Tabla 9: Transiciones de nota a nota.....	52
Tabla 10: Matriz de transición de estados de 1er orden de "Un elefante se balanceaba" ...	53
Tabla 11: Matriz de transición de estados de segundo grado.	55
Tabla 12: Secuencias de notas fragmento "Oh Susanna"	56
Tabla 13: Matriz de distribuciones acumuladas	57
Tabla 14: Valores de composición de fragmento musical monofónico	59
Tabla 15: Tipo de proyecto y descripción	60
Tabla 16: Lista de requerimientos	61
Tabla 17: Caso de uso: Compone fragmento musical monofónico	62
Tabla 18: Valores de los tonos de las notas musicales en jMusic.....	75
Tabla 19: Valores de ritmo de las notas musicales en jMusic	76
Tabla 20: Valores de dinámica de las notas musicales en jMusic.....	76

INTRODUCCION

La aplicación del modelo de cadenas de Markov es amplia en diversas áreas de estudio (matemática, estadística, económica, simulación y otros), no obstante en esta investigación el modelo será aplicado y orientado a una actividad artística, la música, puntualmente a la composición de fragmentos musicales monofónicos.

Para este fin, la estructura de la presente tesis de grado está compuesta por cuatro capítulos:

Capítulo 1 Marco Preliminar: donde se investiga el estado del arte, se identifica la problemática, y mediante estos se procede al reconocimiento de objetivos e hipótesis, así mismo se plantea el diseño metodológico, las justificaciones y alcances.

Capítulo 2 Marco Teórico: presenta las bases teóricas que sustentan la presente investigación, entre algunas de ellas: música, notación musical, proceso de composición de una melodía, cadenas de Markov y modelos de desarrollo.

Capítulo 3 Ingeniería del prototipo: detalla los procesos de un compositor al crear fragmentos musicales monofónicos, el modelo de Cadena de Markov que se aplica al mismo fin y también el modelado del prototipo, desde el análisis, pasando al diseño y finalizando en la construcción del mismo.

Capítulo 4 Marco de conclusiones: presenta las conclusiones, el estado de cumplimiento de objetivos, estado de cumplimiento de hipótesis, trabajos futuros y recomendaciones.

CAPÍTULO 1

MARCO PRELIMINAR

Resumen

A lo largo de este capítulo preliminar, se identifica la problemática que aborda esta investigación para reconocer el objetivo e hipótesis a los que se quiere arribar conceptualizando las áreas de música e inteligencia artificial. Así mismo se plantean las justificaciones, alcances y el diseño metodológico con los cuales debe contar toda investigación.

1.1 Estado del arte

La música es parte del hombre desde el origen mismo de la humanidad y seguirá estando con él hasta el final de sus días. Nietzsche (1998) expresó: *“Sin la música, la vida sería un error”* (P. 6). Un pensamiento muy apropiado ya que con la carencia de ella el ser humano tendría un gran vacío en su existir.

Al igual que otras artes, el talento para hacer música es netamente humano. Pero es innegable el hecho de que un sistema computacional equipado con IA u otra técnica y que posea capacidades musicales en composición o interpretación es muy interesante. Esto motiva a los investigadores del área y también a los músicos: a estudiar, desarrollar y aplicar estos sistemas a sus respectivos trabajos.

A continuación se revisan algunas consideraciones de la creación musical y cómo las técnicas de IA (sistemas expertos, algoritmos genéticos, redes neuronales, lógica difusa y otros) han intervenido a varios niveles en proyectos musicales.

En cuanto a Sistemas Expertos determinísticos, existen proyectos que pueden ayudar a generar modificaciones melódicas sobre una base musical ya establecida, tal es el caso de SaSex, que siendo aún primitivo demuestra que es posible modificar una melodía cargada en el sistema, respetando la idea original

y añadiéndole matices. Esto podría ser un preámbulo para la creación de futuros hilos musicales auto generados.

“Saxex es un sistema inteligente basado en el razonamiento por casos. El razonamiento basado en casos es aquel que cuando se presenta un problema, busca si se ha resuelto uno similar y aplica una solución parecida a la del caso encontrado (Peña, 2009, p.17).

Saxex recibe como entrada una melodía simple interpretada por un humano y crea modificaciones sobre esta melodía que añaden expresividad a la pieza. Saxex analiza la pieza musical recibida mediante un sistema llamado SMS (Spectral Modeling System). Este sistema se basa en el análisis espectral de las piezas y lo que hace es extraer información sobre la expresividad, la armonía y la dinámica de la melodía, con tal de obtener una representación de esta sobre la que trabajar. Una vez almacenadas estas piezas, el sistema las modifica usando criterios de similitud junto con su conocimiento musical. El sistema infiere una serie de posibles cambios sobre las melodías y genera las nuevas versiones usando el SMS.” (Figura 1) (Peña, 2009, p.18).

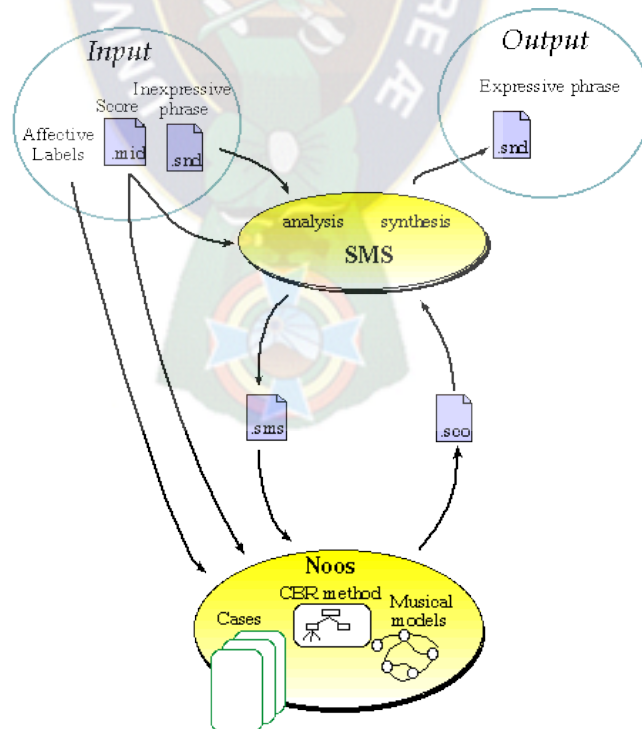


Figura 1: Diagrama del sistema Saxex

Fuente: <http://www.iiia.csic.es/Projects/music/Project-sc.gif>

No se puede descartar el uso de algoritmos genéticos en las investigaciones aunque estos no hayan sido diseñados para imitar comportamiento humano sino para resolver problemas y optimizar las posibles soluciones. Tomando en cuenta lo anterior existen proyectos como el de los investigadores Ezequiel Mondalver, Hernán Merlino y Enrique Fernández de la Universidad de Buenos Aires, que tomaron a la composición musical como un problema, que es: encontrar una canción que suene bien al oído (Moldaver, Merlino & Fernández, 2014).

“La idea principal del sistema se centra en mezclar de forma aleatoria distintos temas musicales de forma iterativa, en cada iteración se seleccionarán las mejores canciones para ser la base de la iteración siguiente. Además, en base a una variable probabilística se realizará un cambio aleatorio sobre uno de los compases de alguno de los temas, que también será elegido al azar. Luego de varias repeticiones se obtendrán como resultado distintas piezas musicales que serán totalmente distintas a las primeras, generando de esta forma, nueva música” (Moldaver, Merlino & Fernández, 2014, p.1).

Los algoritmos genéticos no solo fueron aplicados para generar música, sino también para la interpretación. Ese es el caso del proyecto HAILE desarrollado por los profesores Gil Weinberg, Scott Driscoll y Mitchell Parry del Tecnológico de Georgia. Al interpretar o reproducir fragmentos musicales HAILE identifica el ritmo, la expresividad y el género musical, todo esto lo realiza aplicando un algoritmo de selección para mantener en memoria los fragmentos musicales más parecidos a la música que está escuchando, sobre este conjunto de frases o fragmentos aplica algoritmos de improvisación para acompañar la música tocando la percusión.

“El proyecto Haile está basado en un robot dotado de dos brazos mecánicos que es capaz de tocar instrumentos de percusión (Figura 2), en concreto la batería. El proyecto fue creado por el profesor Gil Weinberg del Georgia Institute of Technology (Weinberg, Driscoll & Parry, 2006). El robot está dotado de inteligencia artificial que le permite escuchar la música que otros músicos están tocando, analizarla en tiempo real y usar este análisis

para repetir lo que ha escuchado de una manera más expresiva, o para acompañar el ritmo de la música.

El robot se conecta a un ordenador, mediante el cual se pueden modificar parámetros para ajustarlo al estilo de los músicos.

El proyecto está todavía en fase de desarrollo, de momento Haile sólo es capaz de tocar un único tambor y sólo uno de sus brazos funciona, por lo que de momento se puede utilizar para que toque como acompañamiento.” (Peña, 2009, p.20).



Figura 2: Aspecto de HAILE

Fuente: <http://gtalumnimag.com/wp-content/uploads/2012/05/Haile.jpg>

Recientemente se desarrolló un proyecto en la UNAM¹ que utiliza IA para crear músicos virtuales que conformen una orquesta sinfónica, la cual interpretara la obra musical del maestro Angelo Sturiale (Juriquilla & Querétaro, 2011), se empleó la teoría de conjuntos difusos y redes neuronales para extraer y convertir en vectores y patrones la lógica empleada por el compositor. Durante la ejecución de la partitura, esta posee espacios para que los músicos virtuales puedan improvisar e innovar basados en los patrones antes mencionados.

“La obra Fantome (Fantasma), del compositor italiano contemporáneo Angelo Sturiale, tendrá su estreno mundial en la UNAM con una orquesta de 87 músicos virtuales, que emitirá los sonidos indicados por la partitura desde un programa de

¹ **UNAM** Universidad Nacional Autónoma de México.

cómputo, diseñado con técnicas de inteligencia artificial en el Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada (CFATA), de esta casa de estudios.

En lugar de los habituales intérpretes humanos con sus instrumentos, una red de 16 parlantes colocados en el salón reproducirá los sonidos que escuchara el público. El reto más importante del sistema es respetar un rasgo singular de la obra que considera espacios en la partitura reservados para la improvisación musical. El sistema combina técnicas de inteligencia artificial que simulan a los instrumentistas en improvisación, se utilizan sonidos de alta calidad acústica de la Viena Symphonic Library (VSL)² y se programa en Max MSP³, que maneja el audio de manera adecuada

En su partitura, Sturiale creó una estructura que da pauta para que la innovación ocurra en un cierto rango y, con ello, evita una música caótica. Fantome tiene una compleja estructura técnica que los avances han ayudado a desentrañar. “Simular la improvisación es el mayor reto del proyecto, pues implica emplear inteligencia artificial”.

Para trasladar la obra musical a la programación computacional, Barragán y sus maestros unieron elementos afines y usaron la Teoría de Conjuntos” (Juriquilla & Querétaro, 2011).

Un proyecto mucho más avanzado es IAMUS realizado por investigadores de la Universidad de Málaga (Figura 3), se trata de una supercomputadora de 1.600 procesadores que puede componer piezas completas de música clásica para orquesta sinfónica, su conocimiento está basado algoritmos y patrones extraídos de expertos de música clásica (Mozart, Beethoven y otros) y clásica contemporánea. El proceso que realiza IAMUS se basa en la toma y procesamiento de decisiones musicales, utilizando sus múltiples procesadores de forma semejante a un algoritmo genético. El proyecto aún está desarrollándose y todavía tiene cierta dificultad con las piezas que compone, ya que estas suenan frías y carentes de sentimiento.

² **Viena Symphonic Library** Software de música y biblioteca de muestras y sonidos orquestales, desarrollado en Viena, Austria

³ **Max MSP** Entorno gráfico para el desarrollo de software de música y multimedia.



Figura 3: El ordenador IAMUS (derecha)

Fuente: <http://cdn.20minutos.es/img2/recortes/2012/07/01/67540-825-550.jpg>

“Iamus, puede componer en escasos minutos más de un centenar de piezas, incluidas obras sinfónicas difícilmente atribuibles a un ordenador.

La máquina, que construye sus creaciones mediante un algoritmo, está especializada en música clásica contemporánea. De hecho, sus obras, plagadas de disonancias, podrían sonar a compositores como Ligeti o Krzysztof Penderecki, según el escritor Philip Ball (autor de El instinto musical). Pese a la frialdad del tipo de composición, los creadores del proyecto le atribuyen la capacidad de generar emociones musicales y de reconocer la dificultad que entraña para el ser humano la interpretación (como que un músico no pueda tocar 10 notas a la vez).

Para añadir un componente humano a la música, Melomics Records (la discográfica fundada para editar la música de Iamus) pidió a la London Symphony Orchestra que grabase una de las piezas. El resultado es un disco interpretado por solistas de primer nivel y dirigido por el maestro Borja Quintas.” (Berdú, 2012).

Por último también se encuentran aquellos Sistemas Expertos probabilísticos que para inferir el conocimiento utilizan Cadenas de Markov y el Teorema de Bayes. El año 2010, el matemático y músico profesional Christopher Raphael, de la Universidad de Indiana investigó la posibilidad de analizar señales musicales para predecir eventos que suceden durante el desarrollo de la melodía (notas, silencios, duraciones, alteraciones y otros). Por ejemplo, se tiene una partitura musical monofónica y una señal acústica muestreada de la misma; la intención

es que el sistema pueda acompañar al músico durante la ejecución de una pieza. Para el proyecto se utilizó la teoría de Cadenas de Markov, Hidden y Modelos Bayesianos, para finalmente implementar un sistema computarizado llamado Music Plus One (Raphael, 2010).

1.2 Método y tipo de investigación

En el presente trabajo de investigación se utiliza el Método Científico que consiste en la observación, la inducción, establecimiento de hipótesis, experimentación de la hipótesis, la refutación de la antítesis y la tesis. Más específicamente dentro del método científico se utilizara el método lógico deductivo.

Para el tipo de investigación se responde a un desarrollo de investigación donde se aplicara inicialmente un enfoque exploratorio para preparar el terreno recolectando, analizando y describiendo la información referente a la investigación, posteriormente pasará al enfoque descriptivo para detectar las variables y elementos que ayudaran a fundamentar el estudio, finalmente se aplicará el enfoque explicativo que complementará y relacionará las variables para poder explicar las causas y requerimientos de la investigación en cuestión.

1.3 Planteamiento del problema

El hombre desde que nace tiene la necesidad irrefrenable de expresarse, de decir lo que siente, lo que vive y lo que piensa, una de las formas más recurridas de expresión es y será en gran medida el arte (pintura, escultura, música, teatro, danza, poesía, literatura y otros), para lo cual se necesita capacidad interpretativa, talento, imaginación y por supuesto mucha creatividad.

Si se habla de música es un hecho que ella es parte fundamental de la vida, sin excepción todos se relacionan día a día con ella, ya sea como parte creadora (compositores), como intérpretes o como simples escuchas.

Las personas interesadas en el ámbito musical que necesitan componer música, tienen en muchos casos la dificultad de no poder transmitir correctamente esa motivación creadora hasta transformarla en música porque no poseen

conocimiento teórico, habilidad musical o talento para componer. En tal circunstancia, algunos recurren a centros de formación musical (institutos, escuelas, conservatorio de música y otros) para recibir el conocimiento teórico y la capacitación musical necesaria para poder componer, o por último solicitan a compositores expertos poder elaborarles una canción según sus requerimientos. Otra situación identificada es de personas empíricas en la música (músicos no teóricos); entendiéndose que estos nunca estudiaron teoría musical pero crean música sin saber de escalas o armonía en el sentido académico y simplemente usan sus creaciones musicales para comunicarse sin importarles la calidad de la composición que realizaron.

Los músicos profesionales también atraviesan por algunos problemas, más allá de tener el conocimiento teórico adecuado, el talento y otros atributos necesarios para componer, carecen de algo fundamental, inspiración.

Según Alvaro, Miranda & Barros (2005), la composición musical es un proceso algo más complejo que la simple asociación de elementos. Comprende una serie de fases y subprocesos que suceden en la abstracción de la imaginación del compositor, tales como el conocimiento y la inspiración.

Un músico muchas veces atraviesa etapas donde sufre un bloqueo creativo o simplemente la inspiración desaparece, este hecho limita su producción musical, Simberg (1992) cree que las principales causas son:

- Vivir una vida en forma rutinaria.
- Perfeccionismo excesivo.
- Falta de confianza en uno mismo
- Falta de concentración
- Perdida de motivaciones.
- Etapas depresivas o de aflicción por sucesos varios.
- Falta de convicción en lo que se desea hacer.

Sin inspiración un artista queda totalmente estancado, nada puede hacer y nada puede producir. Los compositores al encontrarse en esa situación y al verse necesitados de producir buscan otras formas de continuar su trabajo, una de ellas es recurriendo a música ya existente que incentive o les sirva de inspiración, de la que extraen: modelos, patrones, melodías, arreglos o estructuras que con una serie de retoques complementen o sean base de sus futuros trabajos, lastimosamente esto produce que existan composiciones que en cierta forma sean muy parecidas a otras o incluso llegan a ser copias de otras canciones.

Finalmente hacer notar que la composición musical no termina cuando se genera una melodía, en la teoría musical existen 12 notas según la escala cromática (Do, Do#/Reb, Re, Re#/Mib, Mi, Fa, Fa#/Solb, Sol, Sol#/Lab, La, La#/Sib, Si) y símbolos que establecen duraciones en tiempo (redondas, blancas, negras, corcheas, semicorcheas, fusas, semifusas), para el proceso de crear una melodía estas se combinan varias veces, por lo tanto hay muchas combinaciones posibles que darán como resultado melodías, pero de ninguna forma se garantiza independientemente del género musical, que estas sean agradables para escuchar cuando se las interprete o reproduzca.

1.4 Formulación del problema de investigación

En base a la problemática descrita anteriormente, surge la interrogante siguiente:

¿Cuál es el proceso para componer un fragmento musical monofónico agradable al oído, utilizando el modelo probabilístico de las Cadenas de Markov?

1.5 Planteamiento de objetivos e hipótesis

1.5.1 Objetivo General

Utilizar el modelo de inferencia probabilística de las cadenas de Markov para diseñar un proceso que permita componer un fragmento musical de tipo monofónico.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Describir el proceso que implica la composición de un fragmento musical monofónico.
- Diseñar matrices de transición de estados en función a los patrones musicales extraídos de melodías o fragmentos musicales existentes.
- Analizar las probabilidades contenidas en la matriz de transición de estados para determinar el comportamiento correcto y necesario que facilite la composición de un fragmento musical monofónico.
- Diseñar un prototipo funcional orientado a la composición de fragmentos musicales monofónicos agradables al oído.
- Diseñar una vista previa del fragmento musical compuesto, mediante una partitura musical.

1.5.3 Hipótesis

El análisis del comportamiento de la frecuencia de uso de las notas musicales y la probabilidad e identificación de patrones musicales, permite generar matrices de transición de estados en las cadenas de Markov que formulan un modelo aplicable a la composición de fragmentos musicales monofónicos que son agradables al oído.

1.6 Justificación

1.6.1 Académica

Esta tesis sentará un precedente en cómo el modelo de Cadenas de Markov puede aplicarse en la composición de música, el prototipo a desarrollar estará disponible ininterrumpidamente, no cometerá errores y será fuente inagotable de melodías musicales, además de sus ventajas, será el inicio de futuras investigaciones en el área.

1.6.2 Social

Los músicos y la población en general que desean ampliar sus conocimientos y que desean estudiar música respectivamente, necesitan disponer de software comercial o libre: que enseñe, apoye, ayude y demuestre el correcto uso y aplicación de reglas teóricas y prácticas de la música.

El prototipo será de gran apoyo a músicos compositores que atraviesan periodos de falta de inspiración, dándoles acceso a melodías nuevas que éstos podrán usar como impulso creativo o utilizarlas directamente en sus propias creaciones lo que aportara a una mayor variedad a su repertorio musical.

Igualmente será utilizado por personas que no tienen ningún conocimiento sobre música y que necesiten componer melodías musicales de forma sencilla y rápida.

1.6.3 Práctica

Las Cadenas de Markov se presentan como una opción muy viable para el desarrollo de Inteligencia Artificial, ya que el modelo probabilístico en el que se basan es aplicable a diferentes áreas del conocimiento, en este caso para la composición de música. Esta investigación es una aplicación de la IA en el arte de la música, además es un respaldo teórico útil para futuros investigadores que quieran profundizar más en el tema. Para el diseño, construcción e implementación del prototipo se utilizarán herramientas tecnológicas de software como JMUSIC, JAVA y otros.

1.6.4 Económica

Se justifica económicamente porque el prototipo permite sacar patrones musicales y conclusiones probabilísticas, proveerá información de teoría musical, podrá tomar decisiones, aprender de la experiencia y de los datos existentes, comunicarse con expertos humanos, explicar el porqué de las decisiones tomadas y presentar resultados y partituras de fragmentos musicales agradables al oído.

1.7 Alcance

1.7.1 Temporal

El presente proyecto se realizara en un tiempo aproximado de 8 meses, periodo necesario para explorar y adquirir conocimientos necesarios para poder establecer los problemas, objetivos, hipótesis y otros, así como también para realizar el análisis y desarrollo del prototipo en todas sus etapas con las correspondientes pruebas que implica.

1.7.2 Espacial

El presente proyecto de investigación se desarrollara en la ciudad de La Paz Bolivia.



CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

Resumen

Este capítulo presenta las bases teóricas en las cuales se sustenta esta investigación, se inicia con música, teoría y notación musical, el proceso de composición de una melodía y el reconocimiento de patrones musicales, posteriormente se describen características de las Cadenas de Markov y por ultimo las metodologías empleadas en el proyecto.

Para comenzar el capítulo, a continuación se muestran algunas definiciones importantes y de necesario conocimiento para sustentar el proyecto:

- **Pentagrama musical:** (del griego, *penta*: cinco, *grama*: escribir) lugar donde se escriben las notas y todos los demás signos musicales. Tiene cinco líneas y cuatro espacios o interlíneas, que se enumeran de abajo hacia arriba. Las líneas son horizontales, rectas y equidistantes. La música se escribe por signos que se colocan en el pentagrama (Imbernön, 2002).
- **Partitura:** medio de representación musical basado en un sistema de notación (signos musicales) que indica cómo debe interpretarse una composición musical (Ricco, 2014).
- **Teoría musical:** campo de estudio que tiene por objeto la investigación de los diversos elementos de la música, entre ellos el desarrollo y la metodología para analizar, escuchar, comprender y componer música (De Candé, 2002).
- **Composición musical:** arte que tiene como objetivo la creación de obras musicales, es una actividad humana que sirve para la expresión, comunicación y entendimiento entre personas. Se podría dividir en 3 partes básicas: la melodía, la armonía y ritmo (Moldaver, Merlino & Fernández, 2014).

- Monofónico: (del griego, $\mu\omicron\nu\omicron$ [mono]: uno y $\phi\omicron\nu\omicron\varsigma$ [phonos]: sonido, melodía) o monodia, es la textura más sencilla, que consiste en una sola línea melódica sin acompañamiento alguno. La música china, la hindú, los pueblos orientales así como los griegos tuvieron música de textura monofónica. En la música occidental el canto gregoriano es el ejemplo más bello de monofonía (Randel, 2003).
- Género musical: se emplea en música para clasificar obras musicales, dependiendo de criterios específicamente musicales, como el ritmo, la instrumentación, las características armónicas, melódicas o su estructura, y también basados en características no musicales, como la región geográfica de origen, el período histórico, el contexto sociocultural u otros aspectos más amplios de una determinada cultura (Moldaver, Merlino & Fernández, 2014).
- Inteligencia Artificial (I.A.): es aquella “inteligencia” exhibida por “cientefactos” o artefactos científicos contruidos por humanos, o sea que dice que un sistema artificial posee inteligencia cuando es capaz de llevar a cabo tareas que, si fuesen realizadas por un humano, se diría de este que es inteligente. Dentro de las ciencias de la computación, la rama de la I.A. se basa en intentar dotar al funcionamiento de las aplicaciones informáticas de un comportamiento inteligente similar al humano para la toma de decisiones (Romero & Dafonte, 2007).
- Musical Instrument Digital Interface (M.I.D.I.): es un estándar tecnológico que describe un protocolo, una interface digital y conectores que permiten que varios instrumentos musicales electrónicos, computadoras y otros dispositivos relacionados se conecten y comuniquen entre sí. MIDI lleva mensajes de eventos que especifican notación musical, nota, tono y velocidad, señales de control para parámetros musicales como lo son la dinámica, el vibrato, paneo, cues y señales de reloj que establecen y sincronizan el tempo entre varios dispositivos (Huber, 1991).
- Cadenas de Markov: una serie de eventos, en la cual la probabilidad de que ocurra un evento depende del evento inmediato anterior, mediante ellas se puede encontrar la probabilidad de que un sistema se encuentre en un estado

en particular en un momento y también permite encontrar el promedio o las probabilidades de estado estable para cada estado. Con esta información se puede predecir el comportamiento del sistema a través del tiempo (Del Valle, 2015).

2.1 La música

El concepto de música se remonta a la palabra *griega μουσική [τέχνη] - mousikē [téchnē]*, la antigüedad griega lo entendía como “las artes de las musas”, compuesta por poesía, música y danza como una unidad. La definición tradicional indica que es el arte de organizar sensible y lógicamente una combinación coherente de sonidos y silencios utilizando los principios fundamentales de la melodía, la armonía y el ritmo, mediante la intervención de complejos procesos psico-anímicos (Michels, 1987).

La música, como un arte es algo cultural, su fin es evocar experiencias en el oyente y expresar sentimientos, emociones, circunstancias, pensamientos o ideas. La música actúa como estímulo en el oyente e inquieta su campo perceptivo, la música puede cumplir con varias funciones como: entretener, comunicar, ambientar, divertir y otros.

La evolución de la música refleja la evolución del hombre, en ella repercuten ideas filosóficas, religiosas y sociales. El avance tecnológico ha tenido gran influencia, no sólo por los nuevos instrumentos electrónicos creados sino por la comunicación masiva y penetración de esta en los medios de comunicación y en los lugares más remotos (Alsina & Sese, 1994).

2.1.1 Origen de la música

Los primeros pasos de la música en la tierra seguramente fueron muy apasionantes, las hipótesis refieren que en el hombre surgió el irrefrenable deseo de imitar a su entorno, a su naturaleza, de la que él es por supuesto parte, sus primeras expresiones sonoras vienen del escuchar y utilizar sus recursos físicos

para por ejemplo imitar el canto de las aves, rugidos de animales, el viento y por qué no la naturaleza interna de su ser, como los latidos del corazón. El hombre no se limitó a imitar en forma sonora su ambiente, sino que también lo plasmó a través de expresiones como la pintura y la danza (Sag 2009, p.2).

“La imitación y las actividades protoartísticas consecuentes a esta imitación (danza, música, pintura) se iniciaron como prácticas estratégicas de caza, recolección o fertilidad. En primer lugar se trataba de engañar a la presa con sus mismos sonidos, movimientos y bajo una piel similar para poder acercarse y cazarla. Ahora bien, si las representaciones pictóricas y las imitaciones plásticas de la naturaleza, tenían la intención de poseer al animal que se deseaba cazar, las primeras imitaciones del hombre (ya fuera únicamente a través del sonido o con movimientos corporales acompañados de sonidos) perseguían completar la posesión del animal en su esencia, su alma” (Alsina & Sese, 1994, p.17).

Las expresiones mencionadas no solo fueron con propósitos artísticos, llegaron también a ser una herramienta fundamental para la subsistencia humana.

Con el paso del tiempo la música fue transformándose, enriqueciéndose y ya no tan solo fue una imitación de la naturaleza, si no que cada cultura aportó su esencia y nuevos elementos que la enriquecieron más y más, ya sea en la forma en que se interpretaba con la voz o con los diferentes instrumentos que se fabricaban para producir sonidos, no obstante para realmente entender los orígenes de la música se tendrían que reconstruir las primeras civilizaciones.

No existe civilización alguna que no haya manifestado interés por el canto, por la danza o por la invención de instrumentos musicales. Pero reconstruir los primeros pasos de la música en la historia del ser humano no es menos difícil que reconstruir el mundo de las civilizaciones más antiguas, y requiere las mismas técnicas: excavaciones arqueológicas, desciframiento de documentos e interpretación de pinturas y decoraciones (Catucci, 2005, p.8).

2.1.2 Notación y teoría musical

La notación musical es fundamental para el estudio de la música, existen gran diversidad de símbolos, figuras y elementos musicales que principalmente se aplican en la lectura y escritura musical, a continuación se presentan algunos de los más importantes:

- Nota musical: elemento básico y esencial del sonido que está determinado por una vibración cuya frecuencia fundamental es constante, las notas musicales principales son siete **Do, Re, Mi, Fa, Sol, La, Si**. Gracias a estos elementos se conforman las melodías y armonías en la música ya que puestas en conjunto unas con otras, arman sonidos más complejos y duraderos (Latham, 2008).
- Figuras y silencios: en la teoría de la música medieval son términos genéricos para designar símbolos de notación (Tabla 1) (Latham, 2008).

Tabla 1: Figuras y Silencios Musicales

NOMBRE	FIGURA	SILENCIO	VALOR/PULSOS
Redonda			4 Tiempos
Blanca			2 Tiempos
Negra			1 Tiempo
Corchea			1 / 2 Tiempo
Semicorchea			1 / 4 Tiempo
Fusa			1/8 Tiempo
Semifusa			1/16 Tiempo

Fuente: (Latham, 2008)

- Alteraciones: signos usados en la notación musical para indicar una nota ajena a la tonalidad de una pieza o fragmento musical, o bien para suprimir el efecto de alguno de estos signos (Tabla 2). Los signos se escriben antes de la nota que afectan: el sostenido eleva la nota un semitono; el bemol la descende un semitono; el doble sostenido y el doble bemol, respectivamente, la elevan y la descenden un tono entero; el becuadro (natural) cancela el efecto de cualquier otra alteración (Latham, 2008).

Tabla 2: Símbolos de las Alteraciones

ALTERACIONES	
SOSTENIDO	#
BEMOL	b
BOBLE SOSTENIDO	##
DOBLE BEMOL	bb
BECUADRO	□

Fuente: Modificado de (Latham, 2008)

- **Armadura:** grupo de signos de sostenido o bemol escritos al comienzo de una composición (después de la clave) o en el curso de una composición (por lo general después de una doble barra) para indicar la tonalidad de la música (Figura 4). Por su posición en el pentagrama, los signos muestran cuáles notas deben tocarse sostenidas o bemoles consistentemente a lo largo de toda la pieza, en todas las octavas, estableciendo así la tonalidad principal de la música representada en la partitura (Latham, 2008).



Figura 4: Armaduras

Fuente: <http://www.aprende-gratis.com/teoria-musical/imagenes/escalas-relativas.png>

- **Compás:** signo de notación que se escribe al comienzo de una pieza musical, después de la clave y la armadura, o bien a lo largo de la pieza en los momentos en que se requiere indicar un cambio de métrica en la música. Normalmente consiste de una fracción numérica en la que el denominador (número inferior) indica la unidad de medida del pulso en relación con la redonda o semibreve, y el numerador (número superior) indica el número de pulsos o tiempos de dicha unidad contenidos en cada compás (Figura 5) (Latham, 2008).

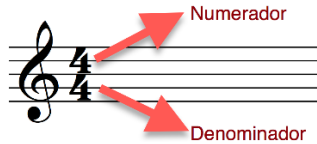


Figura 5: Simbología del Compas

Fuente: <https://entrenamientomusical.files.wordpress.com/2014/06/numerador-denominador.png>

- Clave: signo escrito al inicio del pentagrama para indicar la altura de las notas. Hay tres signos de uso moderno (Figura 6). La clave de Sol (o aguda) se escribe en la segunda línea de abajo hacia arriba en el pentagrama e indica que la altura de la nota escrita en ella es sol; la clave de Fa (o baja) se escribe en la cuarta línea de abajo hacia arriba e indica que la altura de la nota escrita en ella es fa. La clave de Do es movable, y puede encontrarse escrita en la línea central del pentagrama (clave de contralto o de viola) o en la cuarta línea desde abajo (clave de tenor); en cada caso indica que la nota escrita en ella es Do (Latham, 2008).

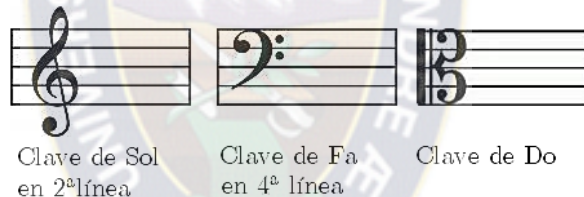


Figura 6: Signos de las claves

Fuente: <http://sites.google.com/site/clasesdemusicaeso/Home/altura/claves.png>

- Cifrado anglosajón o americano: manera de nombrar las notas musicales que comúnmente se conocen en Latinoamérica (do, re, mi, fa sol, la, si) utilizando en su lugar letras de la **A** a la **G** (Tabla 3). Tal cifrado deriva de la notación griega que nombraba las notas desde la letra alfa hasta la gamma, siendo **alfa** la nota **La** y **gamma** la nota **Sol**, con el paso de los siglos se extendió y adopto en las colonias británicas (De Pedro, 2014).

Tabla 3: Cifrado anglosajón o americano

A	B	C	E	E	F	G
La	Si	Do	Re	Mi	Fa	Sol

Fuente: Modificado de (De Pedro, 2014)

- Tonalidad y escala de uso: de la escala material se escogen sonidos y se reúnen en un sistema de referencia en torno a un sonido central o fundamental, al que se denomina tonalidad. Si se ordenan las notas del sistema de referencia según su altura, se obtendrá lo que ha dado en llamarse una escala de uso. La escala de uso siempre se halla dentro del marco de una octava. La forma de subdividir la octava y las distancias entre los sonidos de la escala de uso determinan el género. En el sistema temperado de **12** sonidos pueden distinguirse, fundamentalmente 4 formas de subdivisión de la octava.
 - a) Escala pentatónica o pentáfona: escala de **5** sonidos desprovista de semitonos, con **3** tonos enteros y **2** terceras menores, por ejemplo do – re – mi – sol – la do y una sucesión de grados **1-1-1(1/2)-1- 1(1/2)** .
 - b) Escala por tonos (enteros): escala de **6** sonidos, desprovista de semitonos, con 5 tonos enteros, por ejemplo do – re – mi – fa# - sol# - la# - do y una sucesión de grados **1-1-1-1-1- 1**.
 - c) Escala diatónica: escala de **7** sonidos, con **5** tonos enteros y **2** semitonos por ejemplo escala mayor.
 - d) Escala cromática: escala de **12** sonidos, con sucesión de semitonos, sin tonos enteros. En el sistema temperado es idéntica a la escala material (Michels, 1977).

- Dinámica: es la variación de intensidades del sonido de las notas musicales presentes en una melodía o canción, la misma hace diferencia entre los sonidos suaves, medios y fuertes e incluso posee subdivisiones entre estos (Tabla 4), la intensidad se indica en forma de siglas que utilizan expresiones en italiano (Delgado, 2010).

Tabla 4: Valores de intensidad musical

Término	Se abrevia	Significa
Pianissimo	<i>pp</i>	Muy suave
Piano	<i>p</i>	Suave
Mezzo piano	<i>mp</i>	Medio suave
Mezzo voce	<i>mez voc (m.v.)</i>	A media voz
Sotto voce	<i>sot voc (s.v.)</i>	
Mezzo forte	<i>mf</i>	Medio fuerte
Forte	<i>f</i>	Fuerte
Fortissimo	<i>ff ó fff</i>	Muy fuerte
Forzando	<i> fz</i>	Fuertemente acentuado
Sforzando	<i>sfz ó sf.</i>	Con violencia
Rinforzando	<i>rinf. ó rfz</i>	Reforzando
Crescendo	<i>cresc.</i>	Aumentar gradualmente
Decrescendo	<i>decresc.</i>	Disminuir gradualmente
Diminuendo	<i>dim.</i>	
Calando	<i>cal.</i>	
Smorzando	<i>smorz</i>	Apagando poco a poco

Fuente: (Delgado, 2010)

- Índice de altura: para referirse a una nota sin tener que colocarla en el pentagrama, se utiliza la numeración de las octavas para indicar su altura exacta. Las octavas se numeran tomando como referencia las notas C (Do) en todas sus alturas (Figura 7) (Chamorro, 2009).



Figura 7: Índices de altura de las notas

Fuente: http://1.bp.blogspot.com/_S5Y6qVabppG1nTevMY/s400/indicesac%C3%BAsticos1.jpg

- Tempo: define la velocidad de ejecución de una composición. Los nombres de las velocidades son indicados por expresiones en italiano como: allegro, andante, adagio u otros. Actualmente en música occidental se indica el tempo como Beats Per Minute (BPM) que quiere decir pulsaciones por minuto

(Figura 8). Cuanto mayor es el tiempo, mayor es el número de pulsos por minuto y por tanto la pieza es interpretada a mayor velocidad.

Italian	English	Beats per minute
<i>Presto</i>	Very fast	168-208
<i>Allegro</i>	Fast	120-168
<i>Moderato</i>	Moderate speed	108-120
<i>Andante</i>	Moderate walking speed	76-108
<i>Adagio</i>	Slow (literally "at ease")	66-76
<i>Largo</i>	Slow and solemn	40-66

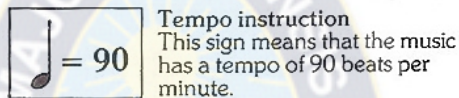


Figura 8: Valores de tempo

Fuente: <http://lawfieldmusic.commons.hwdsb.on.ca/files/2014/01/tempo.jpg>

2.1.3 El Ritmo

Entre las muchas definiciones dadas sobre el ritmo en general, la más difundida es sin duda, la expuesta por D'indy (1912), en su curso de composición musical que dice: "*Ritmo es el orden y proporción en el espacio y en el tiempo*" (p. 32).

Por lo tanto, si se habla del ritmo en su más amplia acepción es una ley de orden y equilibrio a la que junto con el movimiento, están sujetos todos los fenómenos naturales: el movimiento de los astros, el crecimiento de los seres vivos, la sucesión de estaciones, de los días y las noches, y otros. Incluso el propio ser humano cuyo corazón marca el ritmo vital de la circulación y la respiración está sujeto y obedece a un orden de proporción espacial y temporal⁴.

Hablando del ritmo en el ámbito musical, es la estructuración de las diferentes duraciones sonoras independientemente de su altura (De Pedro, 2014).

⁴ En las artes plásticas (pintura, escultura, arquitectura, etc.), el ritmo se desenvuelve en el espacio. En la literatura y la música el ritmo se desarrolla en el tiempo.

Es conveniente ampliar el concepto mencionando diferentes elementos con los que cuenta el ritmo, estos se encuentran en perfecta sincronía y resulta difícil desligarlos unos de otros.

- Ritmo de valores: determinado exclusivamente por la relación que en cuanto a duración, guardan entre sí los sonidos que se ejecutan sucesivamente (Figura 9).



Figura 9: Ejemplo de ritmo de valores
Fuente: (De Pedro, 2014)

- Ritmo melódico: sucesión de sonidos de diferente altura y que debido a la especial atracción de los puntos salientes recrean un determinado ritmo (Figura 10).

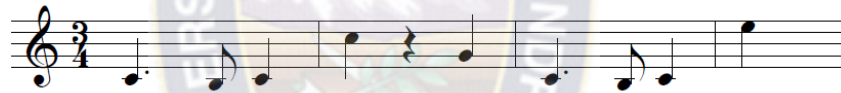


Figura 10: Ejemplo de ritmo melódico
Fuente: (De Pedro, 2014)

- Ritmo dinámico: producido por los cambios de intensidad, ya sea tomando como referencia el conjunto o parte de una obra y utilizando recursos, como el sforzando⁵ sobre determinadas figuras, esto causa que al ejecutar la pieza existan cambios de ritmo momentáneos (Figura 11).



Figura 11: Ejemplo de ritmo dinámico
Fuente: Fr. Schubert. Impromptu nº4, D. 935, Op. post. 142

⁵ Sforzando (sfz): indica que debe hacerse una acentuación fuerte y brusca en una nota o acorde.

- Ritmo armónico: es la frecuencia con la que varían los acordes. Por tanto, el acorde es la unidad fundamental del ritmo armónico (Figura 12) (De Cande, 2002).



Figura 12: Ejemplo de ritmo armónico
Fuente: (De Pedro, 2014)

- Ritmo constructivo o de proporciones: equilibrio necesario, en cuanto a contrastes y coincidencias, entre los diferentes elementos sintácticos y morfológicos que intervienen en la obra musical. Responde y está originado por la espontánea articulación del pensamiento musical. Es lo que se conoce como “forma musical” (De Pedro, 2014).

2.1.1 La Melodía

La melodía es una sucesión de sonidos de diferente altura que es percibida como una sola entidad y que normalmente sigue un esquema armónico. Se desenvuelve con absoluta libertad de movimiento en una secuencia lineal puramente monótona y tiene una identidad y significado propio dentro de un entorno sonoro particular (Edwards, 1956).

Literalmente, una melodía es una combinación de alturas y ritmo, mientras que en el sentido más figurado, el término se ha ampliado para incluir las sucesiones de otros elementos musicales como el timbre. Se considera que la melodía es el primer plano respecto del acompañamiento de fondo (Edwards, 1956).

La melodía, parte y se construye de forma horizontal con eventos sucesivos en el tiempo, y no vertical como sería en un acorde donde los sonidos son

simultáneos. Sin embargo, dicha sucesión contiene cierto tipo de cambios aun así debe ser percibida como una sola entidad.

La melodía suele estar conformada por una o varias frases, o motivos musicales que generalmente se repiten durante una canción o pieza musical. Una melodía es descrita en base a su movimiento melódico, su altura, su tono, los intervalos entre alturas, la tensión, la coherencia, la continuidad, la cadencia y la forma (Edwards, 1956).

Según Toch (1989), toda esta sucesión de sonidos de diferente altura, forma lo que se denomina línea melódica, si la misma está construida solamente como una sucesión de notas (Figura 13), aún no será considerada totalmente una melodía, pero si esta, es complementada agregándole ritmo, con toda razón la línea melódica ya será una melodía porque el ritmo le otorgara vida y espíritu a la misma (Figura 14).

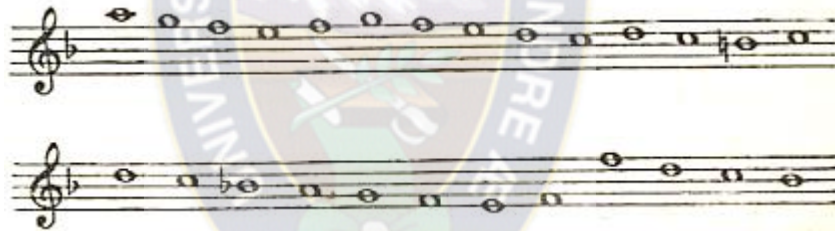


Figura 13: Línea melódica sin ritmo (sucesión de notas)
Fuente: (Toch, 1989)



Figura 14: Línea melódica con ritmo
Fuente: (Toch, 1989)

2.1.2 Armonía

En Grecia el término representaba el perfecto equilibrio físico e intelectual del hombre, esto determinaba su forma de ser a lo largo de su vida. Más cerca en el tiempo, Luis de Góngora dijo *“aún, ante una infame turba de nocturnas aves gimiendo tristes sonidos y volando grave, existe la armonía”*, y Leibniz considera que *“el universo tiene la suficiente armonía, para que todas las especies y elementos que lo forman, puedan existir y coexistir tanto individual como colectivamente con o sin influencias entre ellos”*. Por lo tanto se resume armonía como la conveniente proporción y correspondencia entre algunos elementos y otros (Raso del Molino, 2000).

Para la música, armonía viene representada exactamente lo mismo, un perfecto equilibrio existente a la hora de utilizar y mezclar sonidos.

Si se habla de armonía, emergen conceptos relacionados y necesarios comprender y estudiar la misma:

- Contrapunto: habilidad de poder conducir diversas líneas melódicas en forma simultánea de acuerdo a la estructura y sistema armónico empleado en una composición.
- Progresiones armónicas: movimientos melódicos de un conjunto de tonos que son tocados en forma simultánea a otros, y también se refiere a los principios estructurales para regir tales progresiones.

La armonía ejerce como una forma de acompañamiento y/o base sobre la que se desenvuelven distintas melodías simultáneas, Un único sonido producido no da la sensación de consonancia o disonancia, para que estos elementos existan se deben tocar tres sonidos (acorde) compuestos por una nota fundamental y otras dos armónicas.

Es importante también conocer que melodía y armonía están relacionadas totalmente, siendo la melodía una sucesión expresiva de sonidos en el tiempo

pertenecientes a acordes armónicos, los cuales son enriquecidos con otros sonidos que adornan, suavizan, matizan y producen efectos expresivos.

Las reglas fundamentales de la armonía generalmente se sustentan en las propiedades de la naturaleza, resonancias corporales y también en relaciones numéricas descubiertas por Pitágoras (Isava, 2010). Estas reglas tienen mayor sentido conceptual que musical.

Las reglas armónicas en un contexto menos conceptual, surgen con la música religiosa en los inicios de la historia musical donde se estudian los intervalos paralelos perfectos, los cuales debían preservar la claridad de la pieza original. Este trabajo se llevaba a cabo en catedrales, donde se hacía uso de los modos resonantes de catedrales para crear armonías. La utilización de estos intervalos paralelos se fue sustituyendo lentamente por el estilo inglés de consonancia, que usaba terceras y sextas. Se consideraba que este estilo tenía un sonido más dulce (Reynoso, [s.a.]).

La armonía tradicional de los estilos Barroco, Clásico, Romántico y parte del “Pre barroco”, es conocida como armonía tonal, ya que está basada en el sistema tonal, teniendo una fuerte función estructural. A partir del romanticismo, empieza a utilizarse con más fuerza el valor colorista de la armonía, debilitando paulatinamente la función estructural de la armonía tonal e introduciendo cada vez más modalismos , proceso que da lugar a la aparición de compositores impresionistas, nacionalistas y contemporáneos neoclásicos. La música popular generalmente utiliza armonías modales como es el caso del flamenco, o armonías con un mayor componente tonal empleadas de forma sencilla, caso del tango (Reynoso, [s.a.]).

2.2 Composición musical de melodías

La composición musical es un arte que tiene como objetivo el analizar, transformar y plasmar la creatividad e imaginación sonora y musical de una persona hasta convertirla en obras completas, melodías o fragmentos musicales (Gonzales, 2012).

En base a recopilación y vivencia propia, cuando se habla del proceso que sigue un compositor para crear una melodía simple, podría decirse que no existen pasos o métodos exactos para este propósito, generalmente el componer una melodía es viable gracias a la capacidad musical innata, la imaginación, la creatividad e inspiración del compositor y le es de mucha ayuda si en el proceso se apoya también en: herramientas (teoría musical, reglas de armonía, técnicas de composición), audición de música de diferentes géneros, consejos y sugerencias existentes en libros, internet y de parte de otros compositores.

En palabras de la cantautora boliviana Emma Junaro “...*queda claro que las formas y métodos de composición son tan variados como las búsquedas personales de cada compositor...*”.

A continuación una breve descripción de las situaciones por las que atraviesan los compositores y de los procesos o métodos que estos generalmente utilizan al componer melodías:

- Método para músicos empíricos o autodidactas: un caso común, es de aquellos que componen canciones o melodías sin tener conocimiento de teoría musical. El método que emplean se basa principalmente en la improvisación, búsqueda y experimentación con sonidos o notas que se producen secuencialmente con algún instrumento o con la voz.

Todo este proceso es completamente intuitivo y no necesita de conocimiento musical para aplicarlo, se inicia imaginando y tocando notas o entonando sonidos sucesivos que se desarrollan sin seguir un orden aparente, variando la duración e intensidad de las notas y sin tener preocupación por la extensión temporal de la melodía (Gonzales, 2012).

Decirse que al emplear este método se está creando música o melodías “de oído”. La parte interesante es que sin siquiera saber de su existencia, para qué sirve o que significa, el compositor ya está utilizando cadencias y progresiones, está adaptando la melodía para que concuerde con la dominante y hasta hace uso de intervalos.

Lo único importante para él compositor es dejar fluir su imaginación, su creatividad, su inspiración y expresar lo que siente. Esto es gracias a que posee capacidades musicales innatas como: noción musical intuitiva, buena memoria auditiva, comprensión de códigos básicos que sigue la música y noción del ritmo.

Al concluir el proceso es probable que la melodía creada suene muy bien, que la progresión de notas tenga fuerza y carácter o también habrá casos en que suceda lo contrario y la melodía suene mal o carezca de sentido (Berliner, 1994).

Una forma de facilitar en gran manera el proceso de crear melodías con este método, es utilizar cualquier instrumento para tocar progresiones de acordes que funcionen como base y guía para posteriormente aplicar el mismo método de composición explicado anteriormente. Este proceso se lo conoce como improvisación y para algunos es un gran recurso de composición.

- **Músicos profesionales:** una de las formas que también utilizan es el método anteriormente explicado, con la diferencia que ellos tendrán mayor facilidad para aplicar el mismo y obtener buenos resultados ya que un músico profesional tiene como característica el poseer mayor entrenamiento auditivo, memoria musical, capacidad de improvisación musical y como un plus el conocimiento teórico.

Según experiencia propia, cuando un compositor está creando una melodía, no solo coloca notas musicales al azar para formar la melodía, además de la nota siempre tomara en cuenta: la altura, duración, el compás y el tono, logrando así un sentido y equilibrio en la melodía”. Teóricamente, una de las principales razones para que algunas melodías suenen mejor que otras es que estas se mueven siguiendo siempre una serie de secuencias compuestas por notas musicales y si las notas tocadas o entonadas forman parte de la misma escala musical y se usan ciertos patrones melódicos comunes que dependen del género que se intenta desarrollar, esta

progresión de notas será continua, tendrá movimiento, sentido, armonía y sonara agradable. En cambio sí se utilizan notas al azar la melodía en efecto formara una sucesión melódica pero esta será difícilmente agradable al oído.

A continuación, según Belkin (1999) se presenta la estructura de la composición musical con principios básicos para cualquier construcción musical definiendo los requisitos estructurales del comienzo, la continuación y el desarrollo, hasta la conclusión de la melodía.

- a. Requerimientos estructurales del inicio de una obra musical: el fin del compositor en los primeros segundos de la obra consiste en interesar al oyente de modo que más tarde quiera oír más de la pieza. Metafóricamente, para generar interés, el comienzo debe de plantear una pregunta, la cual sea respondida a medida que se desarrolla la melodía.
- b. Gestos introductorios: tienen en común que son elementos provocadores y de alguna manera requieren de elaboración y continuación; para crear la pregunta referida anteriormente en la mente del oyente. Algunos de estos gestos típicos que usan los compositores en los comienzos son los: crescendos, líneas ascendentes, armonía no resuelta y frases incompletas. Un gesto debe sugerir al oyente que vienen más cosas por delante para comprometer su interés.
- c. Desarrollo con puntos de referencia: para que la música tenga sentido y se desarrolle con fluidez para el oyente, es importante facilitarle señales de tráfico reconocibles; estos puntos de referencia ayudaran a enlazar la obra en su conjunto. Si la melodía transcurre durante mucho tiempo sin una referencia a algo bien definido y familiar, el oyente se pierde.
- d. Clímax: la continuación no sólo debe de llevar las ideas previamente presentadas a lo largo de la obra en un flujo coherente, sino que este flujo debe de desarrollarse en intensidad. Este proceso de intensificación facilita la creación de impulso y dirección. El clímax representa la culminación del impulso. Un clímax es un punto de máxima intensidad,

situado en una frase, una sección, o el movimiento completo donde la música alcanza una culminación emocional/dramática.

- e. El acento culminante: un clímax se completa cuando recorre todo su camino hasta el acento culminante. Este acento representa un extremo en varios aspectos musicales: ritmo, volumen, etc. El número de eventos musicales simultáneos que llegan a un extremo en un climax determinado determina su importancia e intensidad.
- f. La resolución: si el descenso es igual en peso y longitud que la intensificación o más largo, habrá una sensación de resolución.
- g. Final: un final satisfactorio es una de las exigencias formales más difíciles. Ya que el final se oye a la luz del movimiento completo, los balances que le afectan son complejos: debe de satisfacer al oyente en varios niveles arquitectónicos simultáneos y debe cerrar (resolver) completamente cualquier destacado impulso motivico, rítmico, dinámico o melódico.

2.3 Reconocimiento de patrones musicales

El reconocimiento de patrones es aquella ciencia que se ocupa de analizar procesos científicos relacionados con objetos físicos o abstractos, con el propósito de extraer información para establecer propiedades y relaciones entre los conjuntos de dichos objetos, a esta área también se la llama lectura de patrones, identificación de figuras o reconocimiento de formas. Toda la información de los patrones se obtiene por medio de procesos como: análisis, segmentación, extracción de características, y descripción de los objetos. A cada objeto dentro del estudio de reconocimiento se le debe asignar una categoría o clase que las diferencie del resto (Paulus & Hornegger, 1998).

Respecto a la música, toda obra, fragmento o melodía musical es candidata para ser analizada y estudiada, lo esencial del reconocimiento de patrones en la música es la clasificación de la melodía dependiendo de sus características principales que en este caso serán elementos como: nota, duración y altura. En

el análisis también se contabiliza la frecuencia de uso de cada uno de estos objetos en forma individual (Sánchez & Pantrigo, 2010).

Los pasos aplicados para extraer patrones de una melodía musical serán ejemplificados brevemente utilizando como muestra un fragmento de la melodía llamada “*Oh Susanna*” compuesta por Stepen Foster, de la cual se extraerán simplemente los patrones de las notas (Loyd, 2006).

El proceso inicia etiquetando cada una de las notas que componen la melodía del coro de la canción “*Oh Susanna*” (Figura 15).

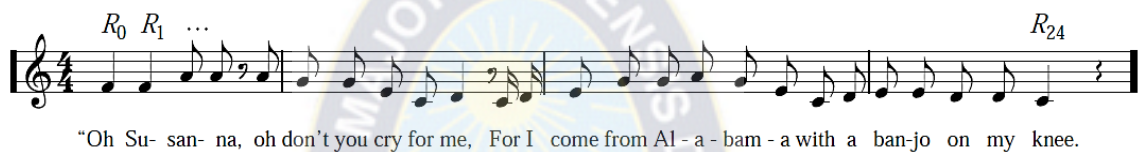


Figura 15: Etiquetado de notas, fragmento “Oh Susanna”

Fuente: (Loyd, 2006)

Las etiquetas van desde R_0 hasta R_{24} , por lo tanto la melodía de este fragmento cuenta con **25** ocurrencias sin tomar en cuenta los silencios, es decir este fragmento melódico está compuesto por **25** notas.

Para continuar el proceso se realiza un conteo de la cantidad de veces que se repite una nota en la melodía, la información resultante se presenta en la (Tabla 5).

Tabla 5: Cantidad de repeticiones por nota

Nota	Cantidad de Repeticiones
A	4
B	0
C	4
D	5
E	5
F	2
G	5

Fuente: Elaboración Propia

Posteriormente se halla la función densidad del fragmento, contando la cantidad de veces que una nota es repetida entre la cantidad de ocurrencias (Tabla 6).

Tabla 6: Función de densidad del fragmento melódico

Notas	C	D	E	F	G	A	B
Probabilidad	4/25	5/25	5/25	2/25	5/25	4/25	0

Fuente: Elaboración propia

El recuento total es expresado como función del número total de notas a manera de histograma (Figura 16).

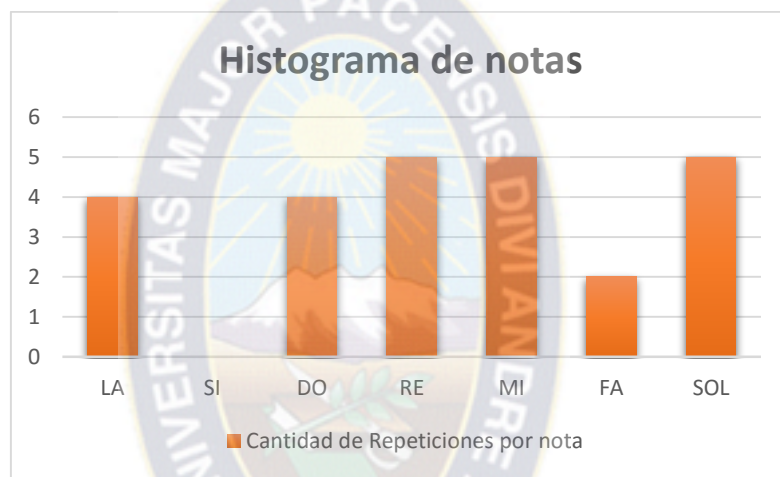


Figura 16: Histograma de notas

Fuente: Elaboración propia

2.4 Cadena de Markov

Según Puerto (2008), es un proceso estocástico discreto que carece de memoria, es decir que cumple con la propiedad de Markov que indica que, la distribución de probabilidad del valor futuro de una variable aleatoria, depende únicamente de su valor presente, siendo independiente de la historia de dicha variable (Ecuación 1).

$$P(X_{n+1} | X_n) \quad (1)$$

Por definición, un proceso $X = \{X_n ; n \geq 0\}$, es una cadena de Markov si satisface la propiedad de Markov (Ecuación 2); el valor de X_n es el estado del proceso en

el tiempo n . Si la distribución de probabilidad condicional de X_{n+1} en estados pasados es una función de X_n por sí sola, entonces:

$$P(X_n = x_n | X_0 = x_0; X_1 = x_1, \dots, X_{n-1} = x_{n-1}) = P(X_n = x_n | X_{n-1} = x_{n-1}) \quad (2)$$

Intuitivamente, se interpreta esta ecuación como que, dado el “presente” del proceso, el “futuro” es independiente del “pasado”. Es decir, una cadena de Markov es una sucesión de variables aleatorias que “ven el pasado a través del último suceso”.

2.4.1 Cadena homogénea

Una cadena de Markov X es homogénea si cumple la (Ecuación 3),

$$P(X_{n+1} = j | X_n = i) = P(X_1 = j | X_0 = i) \quad \forall n \quad (3)$$

Es decir cuando en una cadena dichas probabilidades no dependan del tiempo en que se considere n , la cadena será una cadena homogénea, por lo tanto, las probabilidades son las mismas en cada paso.

En la presente investigación todas las cadenas de Markov que se estudian son homogéneas, ya que ninguna depende del tiempo.

2.4.2 Probabilidades de transición y Matriz de transición

La probabilidad de ir del estado i al estado j en un paso es (Ecuación 4):

$$P_{ij} = \Pr(X_n = j | X_0 = i) \quad (4)$$

En la probabilidad de transición n **pasos** se añade el superíndice de modo que queda (Ecuación 5):

$$P_{ij}^{(n)} = \Pr(X_n = j | X_0 = i) \quad (5)$$

Mediante estas probabilidades de transición se forman las matrices de transición de estados.

Dada una cadena de Markov X , se define su matriz de transición P en **un paso**, como la matriz de las **probabilidades de transición** de dimensión $|S| \times |S|$, (Ecuación 6) (Figura 17).

$$P = (p_{ij})_{i,j \in S} \quad \text{donde} \quad p_{ij} = P(X_1 = j | X_0 = i) \quad (6)$$

$$P = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nn} \end{pmatrix}$$

Figura 17: Matriz de transición en un paso

Fuente: Elaboración propia

Análogamente, esta característica se puede observar en **n pasos** (Ecuación 7), tal como se puede observar de ella se desprende la matriz de transición de “**n pasos**” (Figura 18).

$$P(X_{t+n} = j | X_t = i) = P(X_n = j | X_0 = i) = p_{ij} \quad (7)$$

$$P^n = \begin{bmatrix} p_{00} & \dots & p_{0M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{M0} & \dots & p_{MM} \end{bmatrix}$$

Figura 18: Matriz de transición de N pasos.

Fuente:(Quiroz, 2011)

También Quiroz (2011) explica que, dados los estados i y j , la probabilidad de transición del estado i al estado j será denotada por p_{ij} y designa la probabilidad de que estado j suceda al estado i .

2.4.3 Propiedades y clasificación de estados en una cadena markoviana

Según (Quiroz, 2011), las cadenas de Markov presentan las siguientes propiedades:

- Cualquier estado se comunica consigo mismo, (Ecuación 8)

$$(P_{ij}^{(0)} = P(X_0 = i | X_0 = i) = 1 \quad (8)$$

- Si el estado i se comunica con el estado j , entonces el estado j se comunica con el estado i .
- Si el estado i se comunica con el estado j y el estado j se comunica con el estado k , entonces el estado i se comunica con el estado k .

Es muy útil saber si un proceso que comienza en un estado regresará alguna vez a él. A partir de esta necesidad, surgen los siguientes estados:

- Estado Transitorio: se presenta este caso cuando el proceso ha entrado y salido de un estado y este nunca regresa a él. En tal sentido, se dice que el estado transitorio será visitado sólo un número finito de veces.
- Estado Recurrente: se presenta este caso cuando el proceso, regresa a un estado, después de haber pasado por él. Por lo tanto es recurrente sí y sólo sí no es transitorio. Este estado será visitado un número infinito de veces.
- Estado Absorbente: se presenta este caso después de haber entrado a este, el proceso nunca saldrá de ahí. Por lo tanto, se trata de un estado absorbente sí y sólo sí $P_{ij} = 1$.
- Estado Periódico: se presenta este caso cuando la cadena de Markov presenta un período $k > 1$ y las trayectorias que conducen del estado i de regreso al estado i son múltiplos de k .
- Estado Ergódico: se presenta este caso cuando un estado es recurrente y aperiódico. Una matriz ergódica presenta la particularidad de que sus probabilidades de transición de n pasos convergen a las probabilidades de estado estable conforme n se hace más grande (Quiroz, 2011).

2.4.4 Tipos de cadenas

- Cadena irreducible o reducible: cuando presenta alguna de las siguientes características:

- a) Todos los estados son periódicos con período k y por lo tanto la Cadena de Markov es periódica de período k .
 - b) Ningún estado es periódico, y por lo tanto la Cadena de Markov es aperiódica.
- Cadena Ergódica: si presenta las siguientes características:
 - a) La Cadena de Markov es Irreducible.
 - b) La Cadena de Markov es recurrente.
 - c) La Cadena de Markov es aperiódica.

La ergodicidad es un concepto sumamente importante en el análisis de las cadenas de Markov, pues tiene relación con el comportamiento a largo plazo del sistema. En el largo plazo, se presenta la particularidad de que los estados se hacen estables y diferentes de **cero**. En un régimen permanente, todos los estados tienen una probabilidad no nula (Quiroz, 2011).

- Cadenas absorbentes: un estado i será absorbente si se presenta el caso de que $P_{ij} = 1$, es decir, una vez que se llega a este estado i , permanecerá en estado i .

Una Cadena de Markov es absorbente si presenta por lo menos un estado absorbente y es posible ir, de cada estado no absorbente hasta por lo menos un estado absorbente. Si la cadena de Markov es finita y absorbente, se reordenan los estados transitorios y se obtiene una matriz ordenada de transición en la que se calcula:

- a) El número esperado de veces que se estará en un estado transitorio antes de llegar a un estado absorbente $(I-Q)^{-1}$. Es decir, es el tiempo promedio hasta caer en un Estado Absorbente.
- b) La probabilidad de caer en estados absorbentes $(I-Q)^{-1}R$.

Quiroz (2011), define que la matriz de transición es escrita de la siguiente manera (Figura 19)

$$\mathbf{P} = \begin{array}{c} \begin{array}{c} s-m \text{ filas} \\ m \text{ filas} \end{array} \\ \begin{array}{cc} \begin{array}{c} s-m \\ \text{columnas} \end{array} & \begin{array}{c} m \\ \text{columnas} \end{array} \end{array} \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{Q} & \mathbf{R} \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{array} \right]$$

Figura 19: Matriz de transición de cadenas absorbentes

Fuente: (Quiroz, 2011)

En donde se supone que hay $s-m$ estados transitorios y m estados absorbentes. En esta matriz se presenta la submatriz \mathbf{Q} , la cual representa los Estados No Absorbentes, la submatriz \mathbf{R} a los Estados Absorbentes y la submatriz $\mathbf{1}$ a la matriz identidad (Quiroz, 2011).

2.4.5 Probabilidades de estado estable

Las Cadenas de Markov presentan la característica, de que a medida se va haciendo grande, todos los renglones de la matriz tienen elementos idénticos. En otras palabras puede decirse que los estados se hacen estables, esto significa que la probabilidad de que el sistema esté en cada estado j ya no depende del estado inicial del sistema.

Se llaman probabilidades de estado estable de la Cadena de Markov a aquellos valores j , obtenidos después de un número grande de transiciones. Estos valores son independientes de la probabilidad inicial definida para los estados (Quiroz, 2011).

Es conveniente saber cómo se comporta el sistema después de cierto tiempo, para verificarlo se sigue el siguiente procedimiento.

Para el caso discreto, se utiliza el vector **fila de probabilidades** (Ecuación 9).

$$\pi(m) = |p_1(m), p_2(m), p_3(m) \dots p_n(m)| \quad (9)$$

De esta manera se tiene que (Ecuación 10):

$$\pi(m+n) = \pi(n)[P]^m \quad (10)$$

La (Ecuación 9) define una relación de recurrencia, la cual permite conocer la evolución del vector de probabilidad de estado en el instante m , conociendo el vector de probabilidad inicial, haciendo $n=0$ de la siguiente forma, (Ecuación 11).

$$\pi^m = \pi(0)[P]^m = \dots = \pi(m-2)[P]^2 = \pi(m-1)[P] \quad (11)$$

A medida que aumenta el número de instantes m , las matrices convergerán a un valor estable, independientemente del valor inicial, Por lo tanto cuando el sistema llega a una estado estable j , la probabilidad en estado estable llega a ser como la (Ecuación 12).

$$\pi_j = \lim_{m \rightarrow \infty} [P_{ij}]^m \quad (12)$$

Luego el vector de probabilidades está dado por la (Ecuación 13).

$$\pi = |\pi_1, \pi_2, \pi_3 \dots| \quad (13)$$

Por lo cual se debe cumplir finalmente la condición de probabilidad de la (Ecuación 14)

$$\sum_j \pi_j = 1 \quad (14)$$

2.5 Metodologías

En la presente investigación se utilizan metodologías ya sea para el desarrollo del prototipo como el Modelo en Cascada y también el método que se emplea para la redacción de encuestas. La información teórica de estos procesos es descrita a continuación.

2.5.1 Modelo en Cascada

Según Rojas & Boucchechter (2005), el modelo en cascada es una de las metodologías de desarrollo más conocida y empleada, está basada principalmente en el ciclo convencional de una ingeniería, el paradigma del ciclo de vida abarca las siguientes actividades (Figura 20).

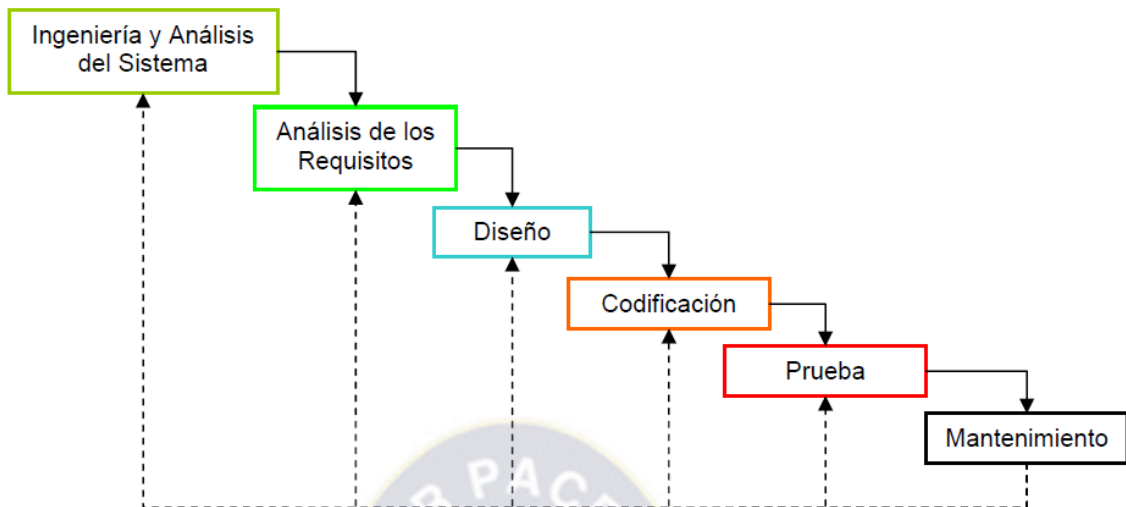


Figura 20: Actividades del modelo en cascada

Fuente: (Rojas & Boucchechter, 2005)

Las actividades son detalladas a continuación:

- Ingeniería y Análisis del Sistema: debido a que el software es siempre parte de un sistema mayor el trabajo comienza estableciendo los requisitos de todos los elementos del sistema y luego asignando algún subconjunto de estos requisitos al software.
- Análisis de los requisitos del software: el proceso de recopilación de los requisitos se centra e intensifica especialmente en el software. El ingeniero de software (Analistas) debe comprender el ámbito de la información del software, así como la función, el rendimiento y las interfaces requeridas.
- Diseño: el diseño del software se enfoca en cuatro atributos distintos del programa: la estructura de los datos, la arquitectura del software, el detalle procedimental y la caracterización de la interfaz. El proceso de diseño traduce los requisitos en una representación del software con la calidad requerida antes de que comience la codificación.
- Codificación: el diseño debe traducirse en una forma legible para la máquina. El paso de codificación realiza esta tarea. Si el diseño se realiza de una manera detallada la codificación puede realizarse mecánicamente.
- Prueba: una vez que se ha generado el código comienza la prueba del programa. La prueba se centra en la lógica interna del software, y en las

funciones externas, realizando pruebas que aseguren que la entrada definida produce los resultados que realmente se requieren.

- **Mantenimiento:** el software sufrirá cambios después de que se entrega al cliente. Los cambios ocurrirán debido a que hayan encontrado errores, a que el software deba adaptarse a cambios del entorno externo (sistema operativo o dispositivos periféricos), o debido a que el cliente requiera ampliaciones funcionales o del rendimiento.

Las características ventajas y desventajas del modelo en cascada se encuentran en la (Tabla 7).

Tabla 7: Características, ventajas y desventajas del modelo en cascada

Características	Ventajas	Desventajas
Es el más utilizado	Se tiene todo bien organizado y no se mezclan las fases.	Se tarda mucho tiempo en pasar por todo el ciclo.
Es una visión del proceso de desarrollo de software como una sucesión de etapas que producen productos intermedios.	La planificación es sencilla.	Es difícil incorporar nuevas cosas si se quiere actualizar.
Para que el proyecto tenga éxito deben desarrollarse todas las fases.	La calidad del producto resultante es alta.	Iteraciones costosas.
Las fases continúan hasta que los objetivos se han cumplido.		
Si se cambia el orden de las fases, el producto final será de inferior calidad		

Fuente: Modificado de (Rojas & Boucchechter, 2005)

2.5.2 Metodología de redacción de encuestas

La redacción de una encuesta es de vital importancia para obtener información acerca del impacto de un estudio o investigación específica. Según la metodología de Huerta (2005), las características que deben poseer una encuesta, es que:

- Debe tener instrucciones claras.
- Debe contener preguntas objetivas.

- Debe tener secuencia lógica.
- Los participantes deben tener conocimiento suficiente para contestarlo.
- Realizarla al nivel del participante.
- Cada pregunta debe medir un sólo objetivo.
- Se deben proveer todas las posibles alternativas en cada pregunta.
- Las categorías deben ser exhaustivas.
- No se deben mezclar diferentes tipos de preguntas en una misma sección.
- Se deben evitar las preguntas largas.
- Se deben evitar las preguntas confusas.
- Debe haber un balance de preguntas positivas y negativas.
- Las preguntas deberán basarse en los objetivos del cuestionario.
- Las preguntas demográficas, de ser estas necesarias, irían en la última sección del cuestionario.
- Debe haber un balance de alternativas positivas y negativas.
- De ser posible, incluya una alternativa neutra.
- El instrumento debe contener ejemplos de preguntas donde se demuestre el procedimiento.
- El cuestionario debe tener un índice de consistencia apropiado.
- El cuestionario debe ser validado.
- Las alternativas negativas deben ser las primeras de izquierda a derecha.
- Si se intenta copiar una forma, se debe solicitar permiso al autor.
- Asegurar el anonimato del participante.
- El lugar de la entrevista debe ser agradable.
- El momento de la entrevista debe ser adecuado para el participante
- El propósito de la entrevista debe quedar claro para el entrevistador y el entrevistado.
- Debe establecerse una buena relación entre el entrevistador y el entrevistado desde antes que se inicie la entrevista.
- Ofrecer incentivos de participación.
- De ofrecer incentivos de participación, se deben cumplir con ellos.

CAPÍTULO 3

INGENIERIA DEL PROTOTIPO

Resumen

Este capítulo presenta inicialmente los procesos que implican componer fragmentos musicales monofónicos, así como también el modelo de Cadena de Markov aplicable al mismo fin. Finalmente se utiliza el modelo de desarrollo en cascada para realizar: el análisis, diseño y construcción del prototipo basado en los objetivos, hipótesis y el conocimiento adquirido durante la investigación.

3.1 Descripción del proceso para crear fragmentos musicales monofónicos.

En el marco teórico del proyecto se define claramente que la composición musical no es un proceso estructurado y basado solamente en el conocimiento teórico musical, el mismo depende principalmente de factores como: la imaginación, inspiración y habilidad musical innata.

La cantautora boliviana Emma Junaro, que ante la pregunta ¿Qué sugerencia tiene para alguien que desea componer melodías musicales?, responde: “...las melodías son más fáciles de hacer utilizando la intuición, ya que la musicalidad la llevamos dentro de nuestro ser, simplemente tarareando y silbando uno ya está inventando y componiendo, por ende, el crear música es la expresión más natural del ser humano, de lo que tiene en su corazón, de lo que siente y vive a diario. Si alguien desea componer simplemente lo tiene que hacer, ver en su interior, experimentar, probar y seguir probando una y otra vez. Quizás no todo lo que uno hace llegará a sonar bien, ahí es, donde se debe ser selectivo y aprender a desechar aquello que no está bien. Es importante también sumar a la intuición, el conocimiento teórico musical para potenciar todo el proceso, una vez creada una melodía el siguiente paso es trabajar sobre ella, corregirla y armonizarla si es necesario...”. Estas palabras reafirman y refuerzan el hecho de que no existe un método o proceso específico para componer música

y obviamente melodías, dejando como la opción adecuada y aplicada mayormente, la simple intuición musical.

No obstante a continuación se listan y ponen a prueba una serie de pasos para deducir un proceso básico cuyo propósito sea el de componer un fragmento musical monofónico, plasmarlo en una hoja pentagramada y formar una partitura.

Todos estos pasos reúnen la teoría y notación musical, consejos de composición y aplicación de intuición e imaginación musical del compositor. Los mismos serán aplicados en un ejemplo básico que se desarrollará punto por punto.

- Elección de un género musical: este es un factor importante a la hora de componer, el compositor debe tener claro el género musical que quiere utilizar para su creación y del mismo modo debe tener conocimiento sobre las particularidades básicas del mismo, como ser: la escala, ritmo en el que se desarrolla y otros.

Para el ejemplo a desarrollar el género seleccionado será “blues”, este género se caracteriza por utilizar escalas pentáfonas menores o mayores que están compuestas por 5 notas, en cuanto a otros aspectos el blues se desarrolla principalmente en ruedas de 12 u 8 compases.

- Elección de escala, tonalidad, compas y tempo: es fundamental para iniciar con la composición de un fragmento musical el definir estas características, las dos primeras permiten identificar con claridad las notas disponibles para utilizar y desarrollar la composición melódica, la tercera proporciona el tipo de compás y la última define la velocidad en que se regirá la composición del género musical seleccionado.

El fragmento musical a componer, al tratarse de “blues” dispone para seleccionar las escalas pentáfonas mayores o menores, en este caso se utiliza una escala menor para darle el toque triste y melancólico característico del género y como tonalidad se escoge la nota de **D**. Por lo tanto la composición de la melodía se desarrollará en la escala de **D** menor

pentatónica. Las notas que componen esta escala son: **D, F, G, A, C, D** (en todas sus alturas) (Figura 21).

El compás seleccionado es **cuatro cuartos**, habitualmente utilizado por el blues (Figura 22), esto significa que se disponen de cuatro tiempos por cada compás. Bajo estas características se moverá el fragmento melódico a componer.



Figura 21: Escala de D menor pentatónica

Fuente: <https://www.basicmusictheory.com/img/d-minor-pentatonic-scale-on-treble-clef.png>



Figura 22: Compas de cuatro cuartos

Fuente: (Latham, 2008)

- Desarrollo y conclusión de la melodía: la primera nota de la melodía es cualquiera de las notas (en sus diferentes alturas) que integran la escala, comúnmente se escoge la primera nota que conforma la escala, en cuanto a la duración esta será a criterio del compositor.

Una vez seleccionada la nota y duración se añade la figura que representa ambas características al pentagrama. Para el resto de elementos de la melodía se procede de la misma forma, siempre respetando que las notas a utilizar pertenezcan a la escala y concuerden con los parámetros del compás en el que se trabaja, opcionalmente en lugar de una nota se añade un silencio a la melodía, todo depende si esta lo requiere en algún punto.

Cabe resaltar que este es el proceso donde más se utiliza la creatividad y la habilidad musical, aquí se prueba y experimenta que notas con determinadas

duraciones suenan mejor que otras según el orden y la fórmula Antecedente/Consecuente que consiste en verificar la nota de la escala que mejor suena basándose en la nota inmediata anterior.

Para finalizar el proceso, para la última nota en la gran mayoría de los géneros musicales, siempre se emplea la tónica (nota inicial de la escala), esto para no dejar la melodía colgada y sin resolución.

Un gran consejo a la hora de componer melodías, es acompañarse con un instrumento musical el cual vaya ejecutando una progresión de acordes basado en la tonalidad, esto motiva, impulsa y activa la capacidad musical natural de improvisar y por consiguiente será fácil seleccionar notas más adecuadas aun sin poseer conocimiento musical.

Reanudando el ejemplo, la primera nota de la melodía será D con una duración de dos tiempos, que en notación musical está representada por una “blanca”, seleccionados ambos parámetros se los añade a la partitura (Figura 23).

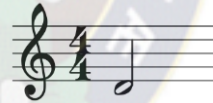


Figura 23: Nota D con 2 tiempos de duración
Fuente: Elaboración propia

La siguiente nota se busca según la nota de D probando y analizando las posibles opciones dentro de la escala. Según criterio musical, analizando los intervalos y de acuerdo a la melodía que se busca crear, se escoge F con una duración de medio tiempo (corchea) como la más apropiada (Figura 24).



Figura 24: Nota F con medio tiempo de duración (derecha)
Fuente: Elaboración propia

El resto de notas que conformaran la melodía se seleccionan bajo los mismos parámetros y criterios, hasta completar una rueda de 8 compases característica del blues.

El producto final al completar el proceso, haber llenado todos los compases y cerrado la línea melódica con la nota D (tónica), se convierte en una melodía básica de blues de 8 compases (Figura 25).

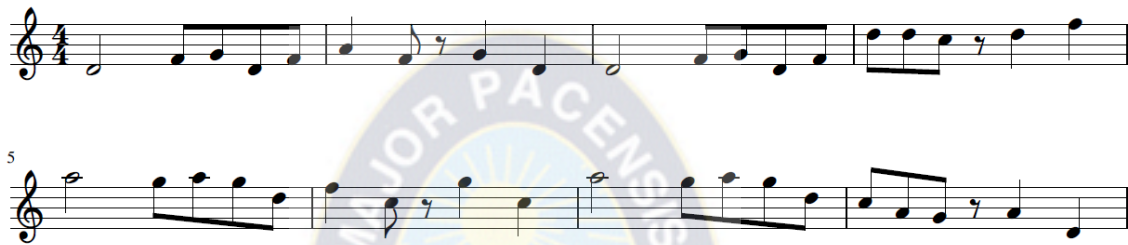


Figura 25: Melodía básica de blues
Fuente: Elaboración propia

De esta forma se concluye con la construcción de un fragmento melódico monofónico. En el (Anexo A) se encuentran otros ejemplos de fragmentos melódicos de diverso género creados utilizando los mismos pasos.

3.2 Modelo de Cadena de Markov aplicable a la composición de fragmentos musicales monofónicos.

Las cadenas de Markov se aplican actualmente en diversas áreas (ciencias sociales, estadística, economía, finanzas, química, medicina, física, aplicaciones de internet y otros) (Basharin, Langville & Naumov, 2004), por supuesto la música no es una excepción y para el desarrollo de este proyecto es necesario definir los procedimientos de las cadenas de Markov que permitan componer fragmentos musicales monofónicos. A continuación se detalla el modelo y los pasos aplicables para este fin y para mejorar la comprensión se acompaña la explicación con un ejemplo simple, con el cual se genera un fragmento melódico monofónico.

3.2.1 Extracción de patrones y repositorio musical

Las cadenas de Markov crean resultados dentro de un determinado contexto, en esta investigación puntualmente en el ámbito musical, que permitirá la generación de fragmentos musicales monofónicos. Para que esto se produzca correctamente es necesario disponer de reglas que lleven adelante el proceso, estas reglas son descubiertas y extraídas a partir de fragmentos o melodías musicales que ya existen. Las reglas en las que se rigen las futuras composiciones se los denomina patrones musicales, sin duda estos aportan información muy valiosa y necesaria que será analizada y procesada en posteriores puntos, por tal motivo es importante realizar una cuidadosa y correcta selección de las melodías y fragmentos melódicos de los cuales se extraerán estos patrones.

El propósito principal de disponer de un repositorio musical, es que el modelo de cadena de Markov que se está implementando cuente con información musical previamente validada por un experto (melodías ya existentes), esto garantiza que los fragmentos musicales monofónicos que se generen a partir del modelo tengan cierto criterio musical y además posean características en un género musical en particular o incluso en un determinado artista. Las cadenas de Markov se pueden usar para componer música que es como otra música.

Para que una melodía o fragmento forme parte del repositorio, debe cumplir por lo menos algún punto:

- Melodías o fragmentos de dominio público: es conveniente seleccionar melodías que gocen de popularidad (antiguas o nuevas), esto garantiza en cierta forma que la melodía candidata tendrá un aval de los oyentes, en cuanto a su calidad musical.
- Melodías o fragmentos que posean riqueza en su estructura musical: el extraer patrones de melodías que contienen riqueza musical, permite generar fragmentos melódicos que también poseen cierta calidad y riqueza musical.

- Melodías o fragmentos con género musical marcado: este punto se aplica en el caso de buscar componer con el modelo un género musical en particular, las características del género mientras más marcadas estén en la melodía serán de mayor utilidad al momento de generar los fragmentos musicales.
- Melodías o fragmentos de artistas conocidos: este punto se aplica en el caso de buscar componer con el modelo fragmentos musicales con estilos y elementos distintivos, cercanos y característicos de un artista o grupo musical en particular.

Algo sumamente importante es que las melodías deben ser monofónicas en su totalidad o que estén adaptadas a esa forma, es decir que posean una única línea melódica.

Posterior a la selección de melodías para el repositorio, se procede con la extracción de los patrones musicales compuestos por:

- Patrones melódicos: son los que aportan información sobre el desarrollo y la frecuencia de uso de las notas en la melodía.
- Patrones rítmicos: son los que aportan información importante sobre el desarrollo y frecuencia de uso de las notas de la melodía pero tomando en cuenta la duración.
- Patrones dinámicos: son los que aportan información sobre la dinámica de volumen de las notas que componen la melodía.

El proceso que implica la extracción de patrones de una muestra fue explicado y ejemplificado en el punto 2.3 del Capítulo 2, otro ejemplo también se muestra en el siguiente punto.

En el (Anexo B) se encuentran melodías que forman parte del repositorio musical del proyecto, las mismas fueron estandarizadas con valores para utilizarlas con la librería JMusic.

3.2.2 Generación de matriz y diagrama de transición de estados

Las cadenas de Markov tienen la particularidad de ser sensibles a su contexto inmediato anterior para crear resultados apropiados, es decir que los estados antecedentes son los que directamente influyen en la probabilidad de decisión para los estados posteriores. Para tal propósito es que se extraen las reglas de conducción del proceso (patrones musicales), y se generan mediante estos, matrices de transición estados, para basados en ellas generar el diagrama de transición.

Las Cadenas de Markov se ordenan en función a sus estados presentes y lo que se evalúa son las transiciones existentes de estado a estado. En este caso los estados son las notas musicales que componen una melodía o fragmento y el paso de la matriz es la transición existente de nota a nota y conforme se desarrolla la melodía. Por lo cual, todas las notas que se evalúan, sean parte de una melodía o conjunto de melodías, serán etiquetadas desde la nota inicial, hasta el correspondiente valor de la nota final.

Sobre un fragmento de una canción infantil llamada “Un elefante se balanceaba” (Figura 26), se aplicaran los procesos. Se inicia con la extracción de los patrones musicales, para posteriormente y basados en los mismos, elaborar la matriz y diagrama de transición de estados.



Figura 26: Fragmento musical de la melodía “Un elefante se balanceaba”

Fuente: http://jertemusic.es/infantil/partituras_canciones/un_elefante.jpg

Para comenzar se asigna a cada nota una etiqueta que la identifique, en total se tiene 43 notas sin contar silencios, las etiquetas van desde R_0 hasta R_{42} .

Para evaluar las notas que componen la melodía y generar matrices de transición adecuadas para que estas permitan generar fragmentos musicales, existen diferentes procesos que varían según el Orden de matriz que se desea obtener.

- Proceso para una cadena de Markov de orden 0: esta cadena tiene la particularidad de que a la hora de usar la técnica de elección ponderada para crear las melodías no toma en cuenta los estados anteriores.

Para calcular una matriz de transición para este grado de cadena, sencillamente se extrae la función de densidad de probabilidad para el fragmento de “un elefante se balanceaba” contando cuántas veces se utiliza una nota en la melodía y se la expresa fraccionado ese valor entre el número total de notas del fragmento melódico (Tabla 8), a esta matriz también se la conoce como histograma.

Tabla 8: Función de densidad del fragmento de “Un elefante se balanceaba”

A	C	D	E	F	G
2/43	1/43	8/43	10/43	9/43	13/43

Fuente: Elaboración propia

Si se alimenta la técnica de elección ponderada de notas con la función de densidad de probabilidades del fragmento melódico, el modelo será capaz de generar una nueva melodía de similares lanzamientos y proporciones que la melodía de donde se extrajo la información, pero tendrá poco o nada del carácter musical del fragmento original, por lo tanto se excluye este Orden de matriz ya que no aporta mucho en el proceso de investigación.

- Proceso para una cadena de Markov de primer orden: puesto que la música se desarrolla en el tiempo, el contexto de cada nota depende de la nota o notas que la preceden, si se desea incorporar contexto en el análisis, es necesario estudiar cómo las notas se suceden en la melodía, para cada nota se debe identificar la nota que le sigue. A partir de esta información se calcula cuál será la probabilidad de seleccionar una nota siguiente, dada la nota actual. Es conveniente recordar que:

Dada una cadena de Markov X_n , se define la matriz de transición P , como la matriz de las probabilidades de transición de dimensión $|S| \times |S|$. (Ecuación 13).

$$P = (p_{ij}) \quad i, j \in S \quad \text{donde} \quad p_{ij} = P(X_1 = j | X_0 = i) \quad (13)$$

Donde P_{ij} = Probabilidad de que la siguiente nota sea i siendo j la actual.

Este proceso se realiza con todas las combinaciones posibles entre las notas que conforman la escala musical de los patrones.

- a) Generar matriz de transición de estados de primer orden: para el ejemplo se empareja cada nota de la melodía con la nota que le sigue. Si se inicia con **C** como la nota actual, para la nota siguiente se iniciara también con **C**. Así que la primera transición en la melodía es **C** → **C**. Para la segunda nota se inicia nuevamente con **C** como nota actual y **D** como siguiente, y luego **E** como siguiente nota, así que la segunda transición es **C** → **D**, la tercera transición es **C** → **A**, y así sucesivamente hasta combinar todos los posibles estados. La tabla de transición (Tabla 9) tabula toda esta información, donde cada celda representa la suma de las transiciones existentes de una nota actual a una siguiente.

Tabla 9: Transiciones de nota a nota

Nota Actual	Nota siguiente					
	C	D	E	F	G	A
C	0	0	0	0	0	0
D	1	3	1	0	1	1
E	0	5	2	1	2	0
F	0	0	7	2	0	0
G	0	0	0	4	6	2
A	0	0	0	0	2	0

Fuente: Elaboración propia

Para construir la matriz de transición de una forma ordenada se emplea la (Ecuación 13) de la siguiente forma:

$X = \text{Notas que componen el fragmento analizado}$

$X = \{C, D, E, F, G, A\}$

Entonces:

La primera fila es descartada del proceso por no contener valores, por lo tanto se procede con la segunda fila, para esta los valores son:

$$P_{DC}[X_{m+1} = D | X_m = C] = \frac{1}{7}$$

$$P_{DD}[X_{m+1} = D | X_m = D] = \frac{3}{7}$$

$$P_{DE}[X_{m+1} = D | X_m = E] = \frac{1}{7}$$

$$P_{DF}[X_{m+1} = D | X_m = F] = \frac{0}{7}$$

$$P_{DG}[X_{m+1} = D | X_m = G] = \frac{1}{7}$$

$$P_{DA}[X_{m+1} = D | X_m = A] = \frac{1}{7}$$

Para la fila analizada, los valores se convierten en funciones de densidad acumulativas, esto se consigue normalizando las filas en base a la suma de las ocurrencias de cada una, es por eso que en los valores de esta fila de **D** el denominador es 7. Esto se realiza porque se requiere que la suma de las probabilidades de cada histograma (fila) sea igual a 1. Para el resto de filas se procede de la misma forma, de tal manera que la matriz de transición de estados queda así (Tabla 10).

Tabla 10: Matriz de transición de estados de 1er orden de “Un elefante se balanceaba”

Nota Actual	Nota siguiente					
	C	D	E	F	G	A
C	0	0	0	0	0	0
D	1/7	3/7	1/7	0	1/7	1/7
E	0	5/10	2/10	1/10	2/10	0
F	0	0	7/9	2/9	0	0
G	0	0	0	4/12	6/12	2/12
A	0	0	0	0	2/2	0

Fuente: Elaboración propia

- b) Construcción del diagrama de transición de estados de primer orden: otra forma de representar la matriz de transición de estados, es mostrando la información como un grafo dirigido, el mismo ilustra el flujo de posibilidades de un estado a otro estado, se construye en base a las probabilidades que figuran en la matriz de transición de estados (Tabla 10), donde los estados están representados por círculos, y las transiciones de estado a estado se representan como arcos (líneas con flechas) (Figura 27).

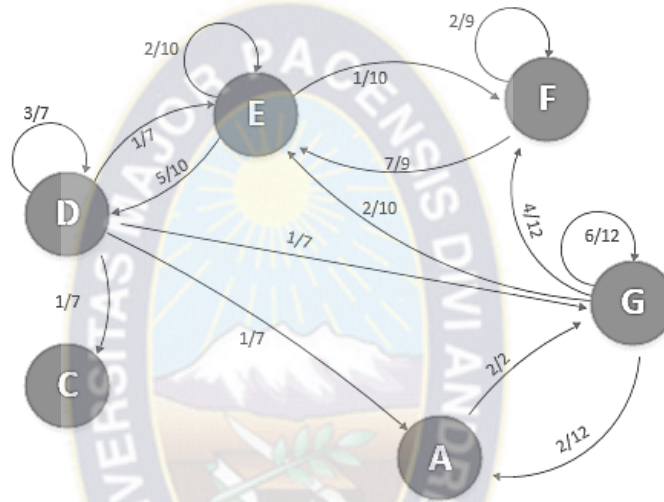


Figura 27: Diagrama de transición de estados de “Un elefante se balanceaba”
Fuente: Elaboración propia

- Proceso para una cadena de Markov de segundo orden: básicamente en este caso se pregunta, dados dos eventos en secuencia ¿cuál es la probabilidad del próximo evento? (Ecuación 14).

$$q = P(R = X_n | x_{n-1}, x_{n-2}) \quad (14)$$

Esto se lee "**q** es la probabilidad de **R** igual a **x_n**, dado que **x_{n-1}** y **x_{n-2}** la preceden en orden".

- a) Generar matriz de transición de estados de segundo orden: utilizando el fragmento de la canción “*Oh Susanna*” que aparece en el **Capítulo 2** (Figura 15), se realizara el ejemplo.

Inicialmente se analiza los datos y la pregunta es ¿Cuántas posibles transiciones de segundo orden se obtienen? En una cadena de Markov de

primer orden el análisis consiste en dos notas (actual y siguiente) por lo cual hay $7^2 = 49$ combinaciones, en la Cadena de Markov de segundo orden el análisis consta de tres notas (anterior, actual y próxima) entonces hay $7^3 = 343$ posibles combinaciones. Como en la cadena de primer orden, cada fila representa una función de densidad de Markov de orden cero que sumada vale **1**.

La tabla que contendrá la matriz estará compuesta por 49 filas y 7 columnas, para ahorrar espacio se dejan de lado las filas que no tienen transiciones. El análisis se muestra en la (Tabla 11). En esta ocasión el análisis será más directo así que el orden de eventos de transición y la normalización de funciones de probabilidad estarán juntos en cada casilla.

Por ejemplo, la primera transición del fragmento “Oh Susanna” parte de la nota F, pasa a F y luego A, esta información se anota **2 (1,00)**, lo que significa que el tono de destino A es la nota **R2** en la melodía, contando desde **R0** y la probabilidad de esta transición es **1,00**.

Tabla 11: Matriz de transición de estados de segundo grado.

Siguiente Anterior:Actual	C	D	E	F	G	A	B
D:C	0	11 (1.00)	0	0	0	0	0
E:C	0	9, 19 (1.00)	0	0	0	0	0
C:D	10 (0.33)	0	12, 20 (0.67)	0	0	0	0
D:D	24 (1.00)	0	0	0	0	0	0
E:D	0	23 (1.00)	0	0	0	0	0
D:E	0	0	21 (0.50)	0	13 (0.50)	0	0
E:E	0	22 (1.00)	0	0	0	0	0
G:E	8, 18 (1.00)	0	0	0	0	0	0
F:F	0	0	0	0	0	2 (1.00)	0
E:G	0	0	0	0	14 (1.00)	0	0
G:G	0	0	7 (0.50)	0	0	15 (0.50)	0
A:G	0	0	17 (0.50)	0	6 (0.50)	0	0
F:A	0	0	0	0	0	3 (1.00)	0
G:A	0	0	0	0	16 (1.00)	0	0
A:A	0	0	0	0	5 (0.50)	4 (0.50)	0

Fuente: Elaboración propia

Es importante añadir que el ritmo y dinámica en este caso acompañan los valores de las notas y son los mismos que la melodía original para facilitar la comparación y mejorar la calidad. También es importante aclarar que la cadena de segundo orden forma un patrón de notas más parecido al original y por ende los fragmentos musicales creados a partir de este orden tendrán mayor parecido a la melodía original. Eso aplica también a cadenas que tengan un orden mayor, mientras más alto es el orden, la composición de la melodía es más parecida a la original, la (Tabla 12) muestra parte de las secuencias de notas del fragmento "Oh Susanna".

Tabla 12: Secuencias de notas fragmento "Oh Susanna"

D:C	D	C	D	E	E	G	E	C	D	E	G	G	A	G	G	E	C	D	C	D	E	E	D	D	C
E:C	E	C	D	E	E	D	D	C	D	C	D	C	D	E	G	G	E	C	D	E	G	G	E	C	D
C:D	C	D	C	D	D	D	E	G	G	E	C	D	C	D	E	E	D	D	C	D	E	G	G	A	G
D:D	D	D	C	D	D	D	E	G	G	E	C	D	C	D	E	E	D	D	C	D	E	G	G	A	G
E:D	E	D	D	C	C	C	D	E	E	D	D	C	D	E	E	D	D	C	D	E	E	D	D	C	D
D:E	D	E	E	D	D	C	D	E	E	D	D	C	D	E	G	G	E	C	D	E	G	G	E	C	D

Fuente: Elaboración propia

- Proceso para una cadena de Markov de orden n: tan solo queda aclarar que si se desea construir una matriz de transición de un orden n, se procede exactamente de la misma forma, pero se debe tomar en cuenta que los cálculos para extracción de patrones y construcción de matrices de transición serán más morosos por cada grado que se aumenta, también es conveniente indicar que el fragmento musical resultante al finalizar el proceso, será de mayor parecido con el fragmento o melodía original y por lo tanto la composición será una simple copia.

3.2.3 Síntesis del proceso de Markov para componer un fragmento musical

Finalmente en este punto se transforma la información disponible de las matrices de transición mediante un proceso que permite formar fragmentos musicales monofónicos. Las características del fragmento a componer están en base a la matriz de transición seleccionada y son las siguientes:

- Existe un número determinado y finito de notas musicales que formaran parte del fragmento musical, está determinado por la escala musical de los patrones que conforman la matriz de transición.
- La melodía es una secuencia de notas, se iniciara y se cerrara generalmente según el valor de la tónica de la escala musical.
- Se añaden las notas una a una, se analiza siempre la nota actual de la melodía y se escoge según ella y basada en la matriz, la nota siguiente más adecuada para ser agregada a la melodía.
- La duración de la melodía está determinada por el que utiliza el método, según el tiempo o el número de notas que vea conveniente.

Para realizar este ejemplo se utiliza la matriz de transición de primer orden del fragmento “Un elefante se balanceaba” que fue generado anteriormente y se encuentra en la (Tabla 10).

Para facilitar el proceso se convierte esta matriz de transición de estados en una matriz de distribución acumulada, para transformar cada fila en una función de distribución acumulada se suma cada celda con todas celdas de la fila hacia la derecha (Tabla 13). Esta matriz de distribución acumulada permite sintetizar una melodía mediante una cadena de Markov de primer orden, esta matriz determina las notas posteriores en función de cómo son probables sus transiciones en la melodía original.

Tabla 13: Matriz de distribuciones acumuladas

	Nota siguiente					
Nota Actual	C	D	E	F	G	A
C	0	0	0	0	0	0
D	0.14	0.58	0.72	0.72	0.86	1
E	0	0.5	0.7	0.8	1	1
F	0	0	0.78	1	1	1
G	0	0	0	0.33	0.83	1
A	0	0	0	0	1	1

Fuente: Elaboración propia

Para generar el fragmento melódico se utiliza la matriz de distribución acumulada (Tabla 13), se selecciona una nota de partida (semilla) al azar desde el espacio muestral $\{D, E, F, G, A\}$ (C se ignora porque no tiene transiciones), luego se selecciona un número randomico entre **0** y **1**, y bajo la regla de ponderación $random \leq P_{ij}$, donde **i** es el valor semilla y **j** los valores del espacio muestral, se va probando la regla en todos los valores, hasta llegar a aquel que satisface la regla. En ese momento **j** se convierte en el valor que inicia el fragmento melódico, el mismo se anota en la partitura musical y se convierte en el nuevo valor semilla y para este se genera otro número randomico y se repite el proceso una y otra vez hasta que se decida parar de generar notas.

- Para la primera nota:

$$\begin{array}{ll}
 \text{semilla} = F & \text{random} = 0.59 \\
 \text{Random} \leq P_{FC} \rightarrow 0,4 \leq 0 & \text{falso} \\
 \text{Random} \leq P_{FD} \rightarrow 0,4 \leq 0 & \text{falso} \\
 \text{Random} \leq P_{FE} \rightarrow 0,4 \leq 0,78 & \text{verdadero}
 \end{array}$$

La nueva semilla es E

- Para la segunda nota:

$$\begin{array}{ll}
 \text{semilla} = F & \text{random} = 0.3 \\
 \text{Random} \leq P_{EC} \rightarrow 0,3 \leq 0 & \text{falso} \\
 \text{Random} \leq P_{ED} \rightarrow 0,3 \leq 0,5 & \text{verdadero}
 \end{array}$$

La nueva semilla es D

- Para la tercer nota:

$$\begin{array}{ll}
 \text{semilla} = D & \text{random} = 0.71 \\
 \text{Random} \leq P_{DC} \rightarrow 0,71 \leq 0,14 & \text{falso} \\
 \text{Random} \leq P_{DD} \rightarrow 0,71 \leq 0,58 & \text{falso} \\
 \text{Random} \leq P_{DE} \rightarrow 0,71 \leq 0,72 & \text{verdadero}
 \end{array}$$

La nueva semilla es E

Se procede de esta manera en forma sucesiva, hasta que se disponga de varias notas para formar una melodía (Tabla 14).

Tabla 14: Valores de composición de fragmento musical monofónico

Nota	Semilla	Ramdon	Salida
1	F	0,4	E
2	E	0,3	D
3	D	0,71	E
4	E	0,21	D
5	D	0,5	D
6	D	0,87	A
7	A	0,14	G
8	G	0,6	G
9	G	0,23	F
10	F	0,32	E
11	E	0,98	G
12	G	0,19	F
13	F	0,49	E
14	E	0,76	F
15	F	0,47	E
16	E	0,52	E
17	E	0,26	D
18	D	0,17	D
19	D	0,74	G
20	G	0,74	G

Fuente: Elaboración propia

La melodía a continuación (Figura 28), fue escrita en una partitura basada en la (Tabla 12), al tratarse de un ejemplo básico, simplemente se escribió la melodía con notas Negras con 1 tiempo de duración.



Figura 28: Fragmento melódico generado por el ejemplo
Fuente: Elaboración propia

3.3 Modelo de desarrollo del prototipo

Para desarrollar el producto software se realizan tareas que parten desde la idea inicial hasta el producto final. Ese desarrollo sigue una determinada metodología o modelo de desarrollo. El modelo de desarrollo establece y organiza el orden en que se realizaran las tareas del proyecto y provee requisitos de entrada y salida para cada una de las actividades.

La metodología de desarrollo que se utilizó para la construcción de la herramienta es el modelo en cascada, a continuación se detallan y aplican sus fases.

3.3.1 Fase de análisis de los requisitos

En esta fase se realizó el proceso de recopilación de los requisitos, que se centra e intensifica principalmente en el software. Para esta fase se utilizaron algunas herramientas del Lenguaje de Modelado Unificado (UML).

3.3.1.1 Objetivo

Se busca modelar, desarrollar y construir un prototipo funcional capaz de componer fragmentos musicales monofónicos, basado en el modelo de cadenas de Markov (Tabla 53).

Tabla 15: Tipo de proyecto y descripción

Proyecto:	Prototipo para composición de fragmentos musicales monofónicos
Descripción:	Herramienta computacional que permite componer fragmentos musicales monofónicos. Estos fragmentos tendrán como característica principal, el estar generados gracias a un modelo de cadena de Markov, a parámetros preestablecidos y a repositorios de melodías musicales existentes que servirán como reglas para mantener la coherencia y calidad del fragmento a componer.

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.2 Requerimientos

Se realiza la clasificación de los requerimientos del presente proyecto, los cuales se identifican con una clave, a la cual se hará referencia en los diagramas más detallados adelante (Tabla 16).

Tabla 16: Lista de requerimientos

Función	Categoría
Seleccionar tonalidad, escala, índice, tempo, duración	Evidente
Seleccionar género musical	Evidente
Seleccionar artista	Evidente
Seleccionar orden de la cadena de Markov	Evidente
Componer fragmento musical monofónico	Oculto
Generar y reproducir partitura musical	Oculto

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.3 Actores y sus relaciones

Establece todos los actores (usuarios, administradores, jefes y otros) que intervienen de alguna forma en los procesos del sistema, identifica sus roles y tareas y establece la relación existente entre ellos. En este caso de estudio el único actor es el usuario final (Figura 29).

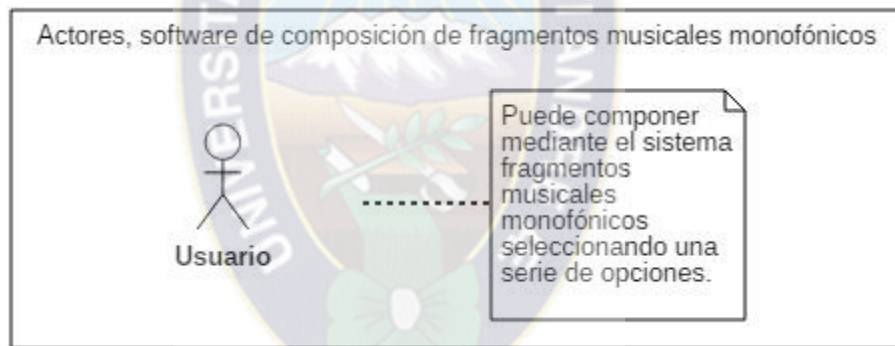


Figura 29: Actores del sistema y sus relaciones

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.4 Casos de Uso

Este diagrama representa la funcionalidad completa de un sistema (o una clase) mostrando su interacción con los agentes externos. Esta representación se hace a través de las relaciones entre los actores (agentes externos) y los casos de uso (acciones) dentro del sistema. Los diagramas de casos de uso definen conjuntos de funcionalidades afines que el sistema debe cumplir para satisfacer todos los requerimientos que tiene a su cargo (Figura 30).

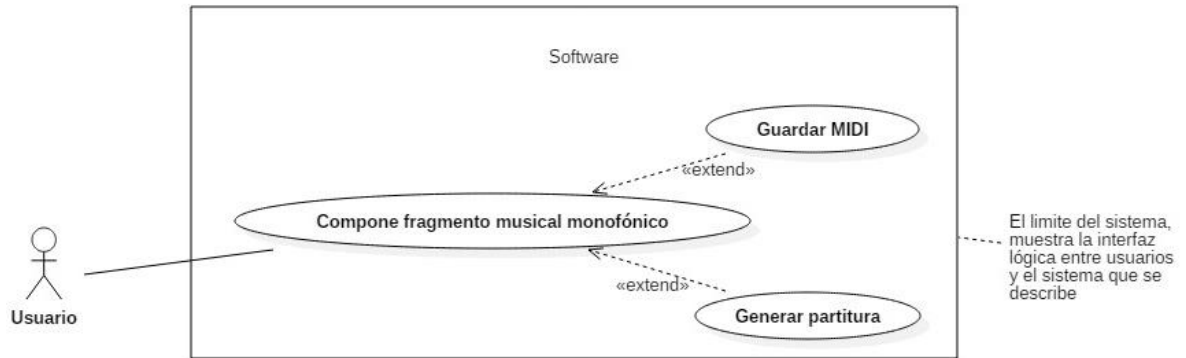


Figura 30: Casos de uso del proyecto
Fuente: Elaboración propia

3.3.1.5 Descripción de los casos de uso

A continuación se presenta la descripción del caso de uso, de manera que se comprenda la funcionalidad más claramente (Tabla 17).

Tabla 17: Caso de uso: Compone fragmento musical monofónico

Caso de Uso:	Compone fragmento musical monofónico
Actores:	Usuario
Descripción:	El usuario selecciona los valores de inicio y en base a ellos genera fragmento musical monofónico.
CURSO NORMAL DE LOS EVENTOS	
ACTOR	RESPUESTA DEL SISTEMA
1. Selecciona los valores de inicio que solicita la GUI como ser: tonalidad, escala, índice, tempo, duración y orden de cadena de Markov. 2. Presiona el botón de componer 9. Presiona botón reproducir 11. Presiona botón ver partitura 13. Presiona botón guardar 14. Selecciona ubicación	3. Carga datos y valida los datos seleccionados. 4. Verifica y analiza melodía almacenada previamente. 5. Comprueba orden de la cadena de Markov. 6. Genera matriz de transición de estados. 7. Compone fragmento musical monofónico. 8. Habilita botones de reproducción, ver partitura y de guardar composición. 10. Carga fragmento y reproduce. 12. Carga fragmento, genera partitura y muestra. 15. Dialogo para seleccionar ubicación para guardar. 16. Guarda fragmento en formato MIDI.

Fuente: Elaboración propia.

3.3.1.6 Diagrama de secuencia de los casos de uso

Los Diagramas de Secuencia representan una interacción entre objetos de manera secuencial en el tiempo. Muestra la participación de objetos en la interacción entre sus “líneas de vida” y los mensajes que ellos organizadamente intercambian en el tiempo. El responsable o actor es quien inicia el ciclo interactuando inicialmente con la interfaz de usuario; en seguida se inician todos los objetos que intervienen en el funcionamiento del aplicativo. En este diagrama se comienza a observar el comportamiento del sistema a partir de los eventos generados por los actores. Aquí se interactúa con instancias, no con clases (Figura 31).

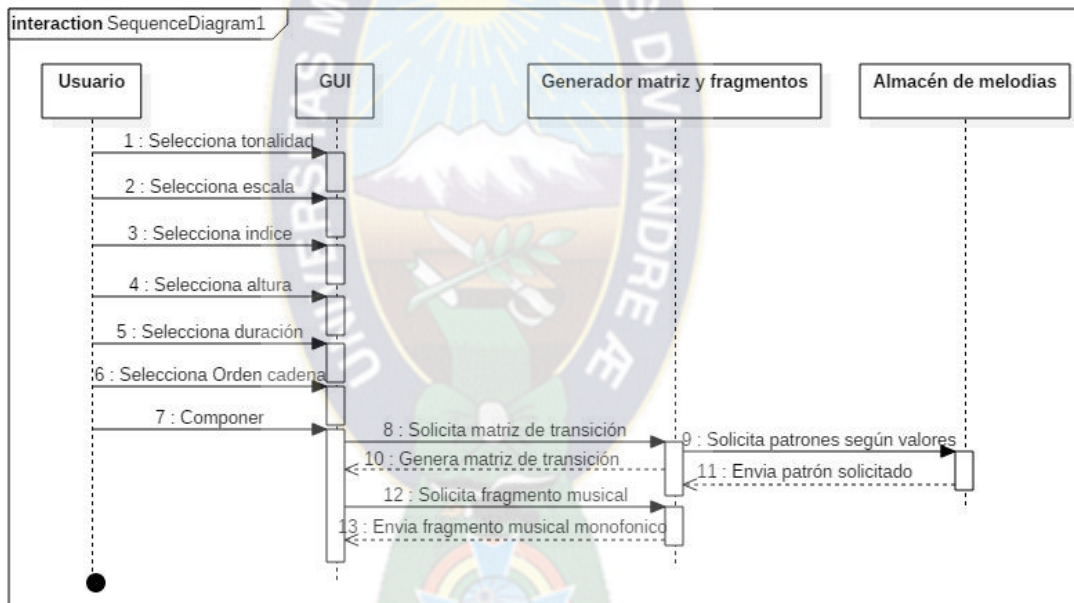


Figura 31: Diagrama de secuencia de Usuario
Fuente: Elaboración propia

3.3.1.7 Diagrama de clases de los casos de uso

Muestra una vista de la aplicación en un determinado momento, es decir, en un instante en que el sistema está detenido. Las clases son la plantilla de los objetos, y se puede ver representados a estos con sus atributos o características y su comportamiento o métodos, así como la relación entre ellos (Figura 32).

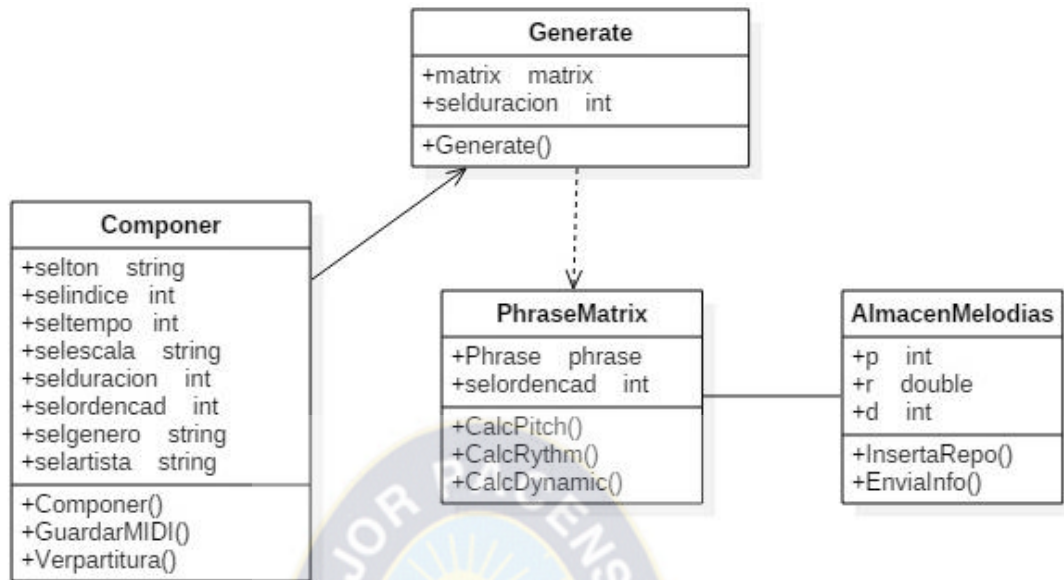


Figura 32: Diagrama de clases
Fuente: Elaboración propia

3.3.2 Fase de diseño

El proceso de diseño permite traducir los requisitos en una representación del software con la calidad requerida antes de que empiece la codificación.

3.3.2.1 Diagrama de actividades

Se utiliza para visualizar, especificar, construir y documentar la dinámica de un conjunto de objetos o simplemente para modelar el flujo de control de una operación (método de una clase). Fundamentalmente es un diagrama de flujo que muestra el flujo de control entre las actividades. En este caso se aprecia en la (Figura 33) como el usuario realiza una serie de pasos seleccionando características musicales, con el propósito de componer un fragmento musical monofónico.

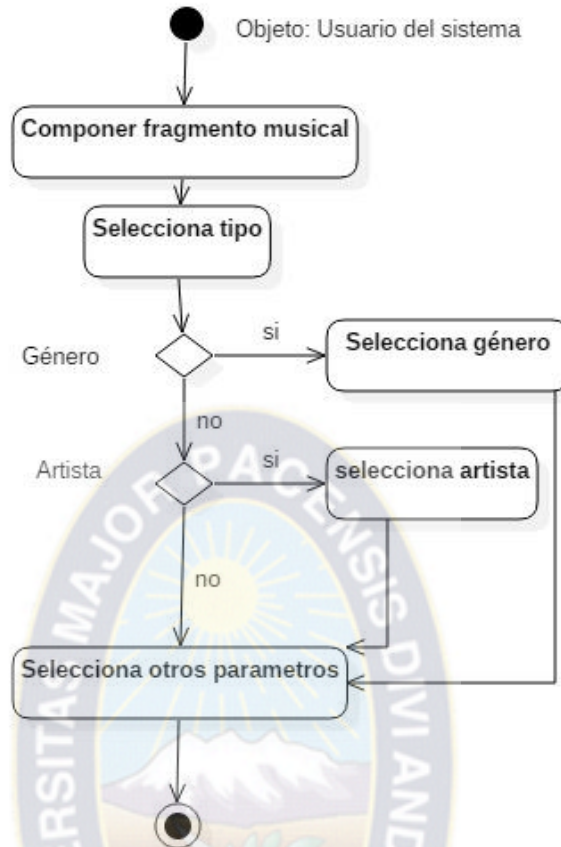


Figura 33: Diagrama de actividades
Fuente: Elaboración propia

3.3.2.2 Diagrama de componentes del proyecto

Un diagrama de componentes muestra los elementos de un diseño de un sistema de software. Un diagrama de componentes permite visualizar la estructura de alto nivel del sistema y el comportamiento del servicio que estos componentes proporcionan y usan a través de interfaces. En la (Figura 34) se observa el diagrama de componentes del software para componer fragmentos musicales monofónicos.

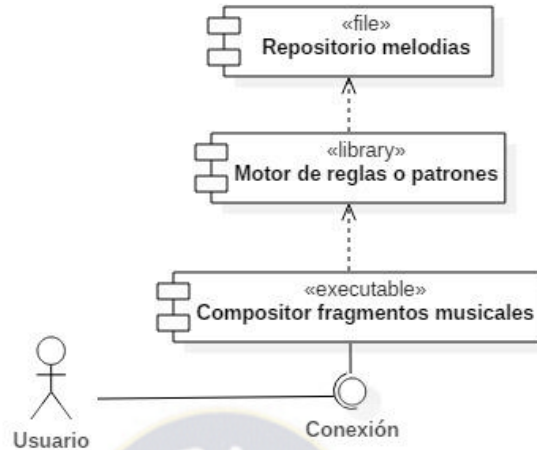


Figura 34: Diagrama de componentes del sistema
Fuente: Elaboración propia

3.3.2.3 Diseño del generador de matriz de transición de estados

En la (Figura 35) se describe el diseño del generador de matriz de transición de estados, este método es capaz de generar las matrices de transición de estados de un fragmento o melodía conocida, de la cual extrae los patrones (nota, ritmo, duración) y según el Orden de cadena de Markov que se le asigne, genera dicha matriz.

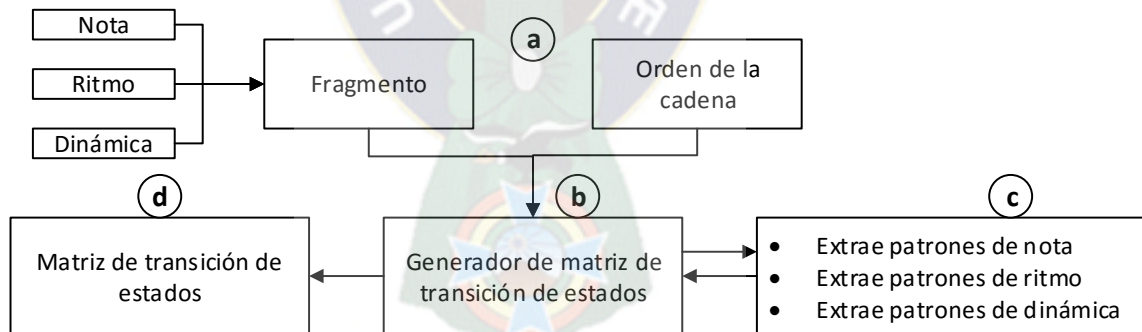


Figura 35: Esquema del modelo Generador de matriz de transición de estados.
Fuente: Elaboración propia.

- a) Hace referencia a los datos de entrada para el generador, en este caso particular a los valores de un fragmento musical conocido y el Orden de la cadena de Markov a utilizar.
- b) Es el método construido para generar la matriz de transición de estados en base al fragmento musical y el orden de la cadena de Markov.

- c) Fase de extracción de los patrones de nota, ritmo y dinámica del fragmento musical introducido.
- d) Resultado obtenido del Generador de matriz de transición de estados, en este caso es la matriz de transición de estados del fragmento musical según orden de la cadena de Markov ingresada.

3.3.2.4 Diseño del generador de frase melódica

En la (Figura 36) se describe el diseño del método que permite decidir los caminos más eficientes para transición entre estados, el mismo es capaz de seleccionar la nota, ritmo y dinámica apropiada, para ir generando una frase melódica. Este método se basa en los valores de los estados, presentes en la matriz de transición de estados de la cadena de Markov y la cantidad de elementos (notas) que requiere el usuario, para generar la frase melódica.

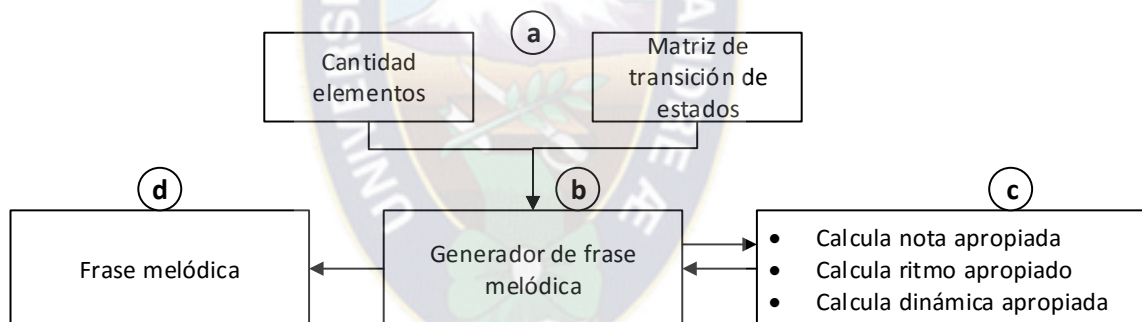


Figura 36: Esquema de modelo para el generador de frase melódica

Fuente: Elaboración propia

- a) Hace referencia a los datos de entrada para el generador, en este caso particular la cantidad de elementos (notas) a generar y la Matriz de transición de estados de la cadena de Markov.
- b) Es el método construido para generar la frase melódica en base a la cantidad de elementos (notas) a generar y la Matriz de transición de estados de la cadena de Markov.
- c) Fase de cálculo de nota, ritmo y dinámica que formaran parte de la frase musical.

- d) Resultado obtenido del Generador de frase melódica, en este caso la frase melódica.

3.3.2.5 Diseño del método para asignar características musicales

En la (Figura 37) se describe el diseño del método para asignar características musicales a una frase melódica para convertirla finalmente a un fragmento musical monofónico asignándole tonalidad, altura y tempo.

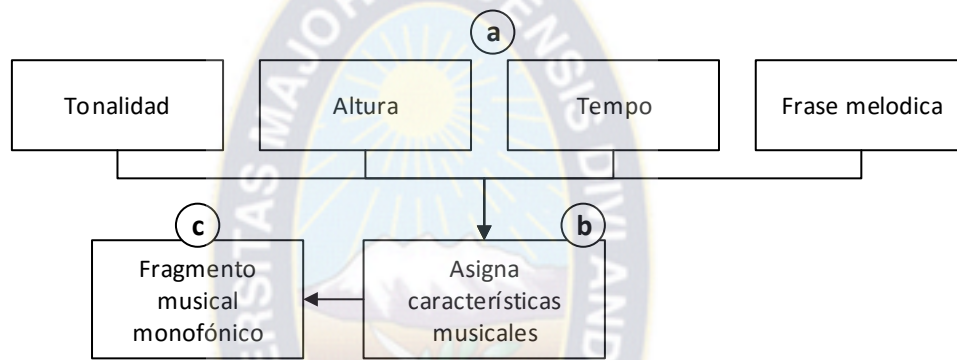


Figura 37: Esquema de modelo para asignación de características musicales
Fuente: Elaboración propia

- a) Hace referencia a los datos de entrada para asignarlos a una frase musical, en este caso particular tonalidad, altura, tempo y la frase musical.
- b) Asigna las características a la frase musical en cuestión.
- c) Resultado obtenido será el fragmento musical monofónico.

3.3.3 Fase de codificación

En la fase de codificación, el diseño debe pasar a traducirse en un lenguaje capaz de ser comprendido y ejecutado por la máquina. Si todo el diseño anterior se realiza de forma detallada, la codificación del producto se hará de una forma ordenada y correcta.

3.3.3.1 Código del método para generar la matriz transición de estados

Se hicieron pruebas para obtener las características generales de una matriz de transición y se las aplico en esta fracción de código. El proceso requiere de dos datos de entrada que son: frase musical existente (compuesta por nota, ritmo y dinámica) y el orden de la cadena (Algoritmo 1).

```
public final class PhraseMatrix implements JMC{
    private AdaptiveMatrix pitchAM;
    private AdaptiveMatrix rhythmAM;
    private AdaptiveMatrix dynamicAM;
    private int pitchDepth;
    private int rhythmDepth;
    private int dynamicDepth;
    private Note[] notes;
    private final double[] rhythmMap = {SB, MD, M, C, CT, CD, Q, QD, QT, SQ,
DSQ};

    public PhraseMatrix(Phrase phrase, int depth){
        this(phrase, depth, depth, depth);
    }

    public PhraseMatrix(Phrase phrase, int pDepth, int rDepth, int dDepth){
        this.pitchDepth = pDepth;
        this.rhythmDepth = rDepth;
        this.dynamicDepth = dDepth;
        this.notes = phrase.getNoteArray();
        calcPitch();
        calcRhythm();
        calcDynamic();
    }

    public void calcPitch(){
        int[] numArray = new int[notes.length];
        for(int i=0;i<notes.length;i++){
            numArray[i]=notes[i].getPitch();
        }
        pitchAM = new AdaptiveMatrix(numArray, this.pitchDepth, 127);
    }

    public void calcRhythm(){
        int[] numArray = new int[notes.length];
        for(int i=0;i<notes.length;i++){
            boolean flag = false;
            for(int j=0;j<rhythmMap.length;j++){
                if(notes[i].getRhythmValue() == rhythmMap[j]){
                    flag = true;
                    numArray[i] = j;
                    break;
                }
            }
            if(flag == false){
                System.err.print("[WARNING] PhraseMatrix only
supports ");
```

```

        System.err.println("rhythm values supported in the JMC
file");
    }
    }
    rhythmAM = new AdaptiveMatrix(numArray, this.rhythmDepth,
this.rhythmMap.length);
    }
    public void calcDynamic(){
        int[] numArray = new int[notes.length];
        for(int i=0;i<notes.length;i++){
            numArray[i]=notes[i].getDynamic();
        }
        dynamicAM = new AdaptiveMatrix(numArray, this.dynamicDepth, 127);
    }
}

```

Algoritmo 1: Generador de matriz de transición de estados

Fuente: Elaboración propia

El nombre del método es **PhraseMatrix()**, el mismo calcula los patrones musicales de nota, ritmo y dinámica, para posteriormente con esos valores hacer operaciones y elaborar la matriz de transición. El proceso devolverá dicha matriz de transición de estados según el valor de orden de cadena que se haya definido previamente.

3.3.3.2 Código para generar frase melódica

Esta parte del código permite generar la melodía en base a la selección de la mejor transición según el estado anterior. El proceso requiere de dos datos de entrada que son: matriz de transición y cantidad de notas a generar (Algoritmo 2).

```

public Phrase generate(boolean p, boolean r, boolean d){
    return this.generate(p, r, d, this.notes.length);
}
public Phrase generate(boolean p, boolean r, boolean d, int numOfNotes){
    int[] pitch = new int[this.pitchDepth];
    int[] rhythm = new int[this.rhythmDepth];
    int[] dynamic = new int[this.dynamicDepth];
    Note[] noteList = new Note[numOfNotes];
    for(int i=0;i<numOfNotes;i++){
        noteList[i] = new Note();
    }
    for(int i=0;i<this.pitchDepth;i++){
        pitch[i] = notes[i].getPitch();
    }
    for(int i=0;i<this.rhythmDepth;i++){
        for(int j=0;j<rhythmMap.length;j++){
            if(notes[i].getRhythmValue() == rhythmMap[j]){
                rhythm[i] = j;
                break;
            }
        }
    }
}

```

```

        for(int i=0;i<this.dynamicDepth;i++){
            dynamic[i] = notes[i].getDynamic();
        }

        int[] retPitch = pitchAM.generate(numOfNotes, pitch);
        int[] retDynamic = dynamicAM.generate(numOfNotes, dynamic);
        int[] retRhythm = rhythmAM.generate(numOfNotes, rhythm);

        if(p){
            for(int i=0;i<numOfNotes;i++){
                noteList[i].setPitch(retPitch[i]);
            }
        }
        if(r){
            for(int i=0;i<numOfNotes;i++){
                noteList[i].setRhythmValue(rhythmMap[retRhythm[i]]);
                noteList[i].setDuration(rhythmMap[retRhythm[i]]*
0.9);
            }
        }
        if(d){
            for(int i=0;i<numOfNotes;i++){
                noteList[i].setDynamic(retDynamic[i]);
            }
        }
        Phrase phrase = new Phrase();
        phrase.addNoteList(noteList);
        return phrase;
    }
}

```

Algoritmo 2: Generador de frase melódica

Fuente: Elaboración propia

Esta parte del código principalmente utiliza las probabilidades de transición de estados presentes en las matrices, para hacer una correcta selección una a una de las notas y las va cargando a una frase melódica según la cantidad requerida. El proceso devolverá esta frase melódica para que finalmente se le agreguen las características musicales.

3.3.3.3 Código para generar fragmento musical monofónico

Finalmente para generar el fragmento musical monofónico se añaden a la frase creada en el proceso anterior, las características que aportaran y darán mayor riqueza y sentido musical, estas se definen en la entrada de datos y son ser: tonalidad, escala, altura, tempo, duración y orden de la cadena de Markov (Algoritmo 3).

```

public Score componer (int t, int a, int te, int esc, int dur,int ord,int gen)
{
    Phrase fragmento = new Phrase();
    a=a*12;
    int[] p =
{64+t+a,62+t+a,60+t+a,62+t+a,64+t+a,64+t+a,64+t+a,62+t+a,62+t+a,62+t+a,64+t+a,6
7+t+a,67+t+a,64+t+a,62+t+a,60+t+a,62+t+a,64+t+a,64+t+a,64+t+a,64+t+a,62+t+a,62+
t+a,64+t+a,62+t+a,60+t+a};
    double[] r = {C,C,C,C,C,C,M,C,C,M,C,C,C,C,C,C,C,C,C,C,C,C,M};
    int[] d =
{80,70,60,70,80,80,80,70,70,70,80,100,100,80,70,60,70,80,80,80,80,70,70,80,70,6
0};

    fragmento.addNoteList(p,r,d);
    int markovDepth = ord;
    PhraseMatrix matrix = new PhraseMatrix(fragmento,markovDepth);
    Phrase melodia = matrix.generate(true,true,true,dur-1);
        Score scr = new Score("Fragmento musical");
        Part part = new Part(73);
        Note f = new Note(48+t+a,M);
        melodia.addNote(f);
        part.addPhrase(melodia);
        scr.addPart(part);
        scr.setTempo(te);
        Write.midi(scr,"fragmento.mid");
        Write.xml(scr,"fragmento.xml");
        View.print(scr);
        return (scr);
}

```

Algoritmo 3: Asignación de características a frase melódica.

Fuente: Elaboración propia.

El algoritmo inicialmente añade a la frase todas las características descritas anteriormente, luego de forma interna guarda la melodía como archivo MIDI y como XML para que este fragmento melódico disponga de dos salidas, una en forma audible al ser reproducida y otra en forma visual como una partitura.

3.3.3.4 Diseño del prototipo

Para realizar la construcción del prototipo de software se acude al lenguaje de programación Java bajo el entorno de desarrollo de Eclipse. En la figura se aprecia la presentación de la Interfaz gráfica de usuario, o en inglés Graphic User Interface (GUI) (Figura 38).

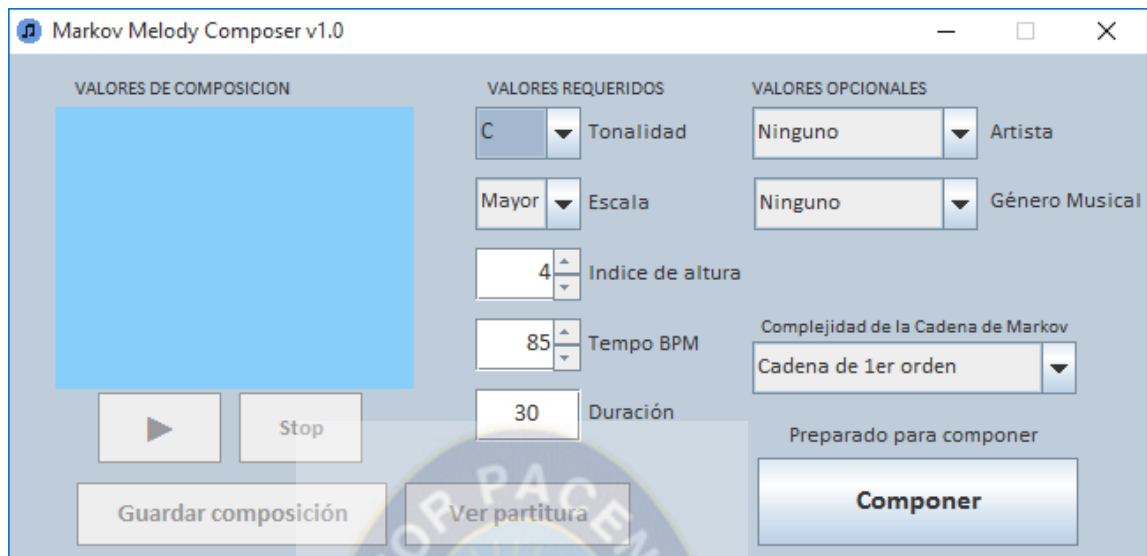


Figura 38: Interfaz gráfica del prototipo

Fuente: Elaboración propia

En la (Figura 39) se observan los valores asignados para la composición de un fragmento musical monofónico, el resultado se lo puede escuchar por medio del botón de reproducción, adicionalmente se puede visualizar la partitura del fragmento musical monofónico y también se dispone de la opción de guardar el mismo en formato MIDI.

La herramienta desarrollada permite componer diferentes tipos de fragmentos melódicos como ser:

- Melodías en todas las tonalidades mayores o menores.
- Melodías de diverso género musical (blues, jazz, rock, folklore nacional y otros).
- Melodías con estilo similar al de diferentes artistas o grupos musicales.

Además los fragmentos musicales compuestos pueden variar sustancialmente, si también se les asigna otras características iniciales disponibles, como: escala, altura, tempo y principalmente orden de cadena de Markov.

En el (Anexo C) se encuentran las partituras de algunos fragmentos musicales compuestos por el prototipo.

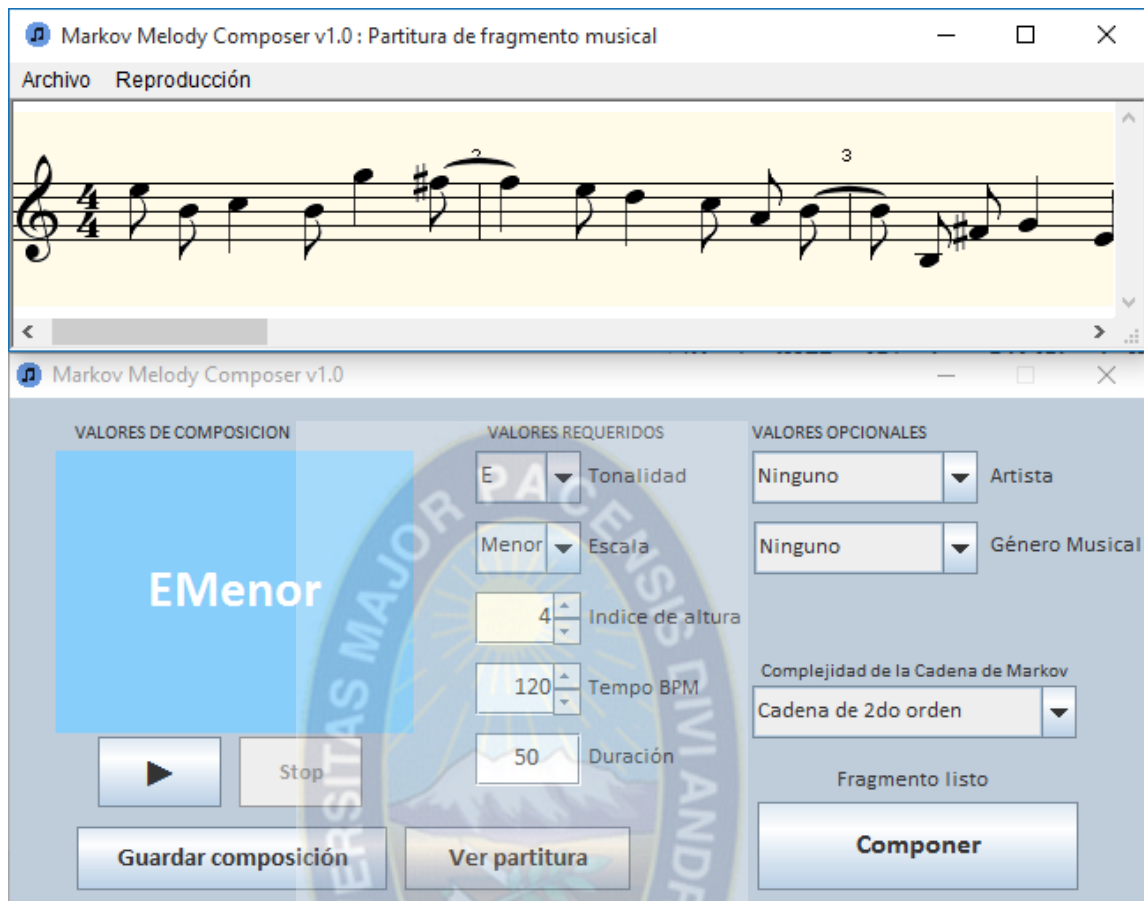


Figura 39: Interfaz gráfica en funcionamiento con ventana de partitura

Fuente: Elaboración propia

3.3.3.5 Herramienta empleada (Librería JMusic)

JMusic es un proyecto diseñado para proveer a los compositores y desarrolladores de software una librería compuesta por herramientas para el procesamiento de audio. Esta librería brinda a los músicos e investigadores una sencilla estructura de datos musicales basada en notas o eventos, y pone a disposición métodos para organizar, manipular y analizar datos procedentes de composiciones musicales.

Es utilizada también para realizar música generativa, construir instrumentos musicales, reproducción interactiva y análisis musical.

En JMusic las partituras, pueden traducirse a formato MIDI o ficheros de audio para su almacenamiento y posterior procesado, o pueden ser reproducidos en tiempo real.

JMusic es un proyecto gratuito de código abierto. JMusic es 100% Java y funciona para cualquier plataforma con soporte Java (Brown, 2009).

- Atributos, sus constantes y valores: en jMusic la clase Note es la estructura más básica, está compuesta por múltiples atributos que permiten manipular gran cantidad de información acerca una nota. Para este proyecto de investigación se utilizan principalmente tres atributos, Pitch (nota en un tono respectivo), Rythm (ritmo de la nota) y Dynamic (dinámica de la nota), para manipular estos se lo hace por medio de constantes las cuales tienen asociados valores asignados, a continuación una descripción de cada atributo y sus respectivas tablas de constantes y valores.
 - a) Pitch: este atributo se refiere al tono de la nota, es decir, la posición y altura de esta dentro de la escala común, sus valores van desde 0 a 127 y se encuentran plasmados en la (Tabla 18).

Tabla 18: Valores de los tonos de las notas musicales en jMusic

Nota/altura	C	C#	D	D#	E	F	F#	G	G#	A	A#	B
0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
2	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
3	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47
4	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59
5	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
6	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83
7	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
8	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107
9	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119
10	120	121	122	123	124	125	126	127				

Fuente: (Brown, 2009)

- b) Rythm: esta característica de ritmo hace referencia a la duración temporal de una nota, entre sus constantes se encuentran las figuras de tiempo como ser: negra, corchea, blanca, entre otras. Sus valores se presentan en la (Tabla 19).

Tabla 19: Valores de ritmo de las notas musicales en jMusic

Figura	Constante	Abreviatura	Valor numérico
Redonda	WHOLE_NOTE	WN	4
Blanca	HALF_NOTE	HN	2
Negra	CROTCHET	C	1
Corchea	EIGHTH_NOTE	EN	0.5
Semicorchea	SEMI_QUAVER	SQ	0.25
Fusa	THIRTYSECOND_NOTE	TN	0.125

Fuente: (Brown, 2009)

- c) Dynamic: se refiere a la dinámica (volumen) de una nota, estas constantes se especifican mediante niveles establecidos, utilizando abreviaturas de los términos italianos comunes para la dinámica, como: pianissimo, forte fortissimo, y otros. Los valores de esta constante van de 0 a 120 (Tabla 20).

Tabla 20: Valores de dinámica de las notas musicales en jMusic

Constante	Valor
SILENT	0
PPP	10
PP	25
P	50
MP	60
MF	70
F	85
FF	100
FFF	120

Fuente: (Brown, 2009)

3.3.4 Fase de prueba, validación y evaluación global de los resultados.

El resultado al que se llegó hasta este punto de la investigación, es un prototipo que utiliza el análisis de patrones musicales extraídos de melodías conocidas o existentes, con el fin de generar matrices de transición de estados en las cadenas de Markov que permiten generar fragmentos musicales monofónicos agradables al oído. No obstante, luego de la generación del código e implementación del mismo, es necesario realizar pruebas al prototipo desarrollado para garantizar su correcto funcionamiento y también para verificar que los resultados que produce mediante la entrada de datos sean los esperados.

3.3.4.1 Prueba y validación del prototipo

Para las pruebas del prototipo de software se realizó una visita al Conservatorio Plurinacional de Música, con el objetivo de realizar las pruebas y validaciones principalmente con personas que están involucradas en el ámbito musical.

Se tomó en tal efecto una muestra de 40 personas entre estudiantes, docentes y personas de paso, a las cuales se les enseñó el prototipo y se les dejó interactuar con él mismo por un lapso de tiempo, posteriormente se les realizó una encuesta para apoyar la validación de los objetivos y de la hipótesis.

La encuesta se encuentra en el (Anexo D), para la elaboración de la misma se siguió recomendaciones y reglas del modelo de redacción y validación de encuestas propuesto por Huerta (2005) "*Procedimiento para redactar y validar los cuestionarios para los estudios de investigación y evaluación*". Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

- **Conocimiento musical y composición:** estas dos preguntas se hicieron con el propósito de verificar que los usuarios tengan un mínimo conocimiento musical y si es posible conocimiento en composición musical para poder evaluar objetivamente el prototipo desarrollado (Figura 40). En la primera pregunta el 70% de las personas afirma conocer la teoría musical, saber tocar

un instrumento o cantar, el 20% que lo hace muy poco quizás por ser alumnos iniciales del conservatorio, un 10% afirma no tener conocimiento alguno, siendo probable que estas personas hayan estado de paso por el lugar. En el caso de la segunda pregunta un 52,5% afirma tener composiciones propias y el restante 47,5% no.

Por los valores obtenidos, se afirma que se cuenta con una población de estudio idónea para responder el resto de preguntas.

¿Tienes conocimiento en teoría musical, sabes tocar algún instrumento musical o cantar?



¿Tienes composiciones musicales propias?

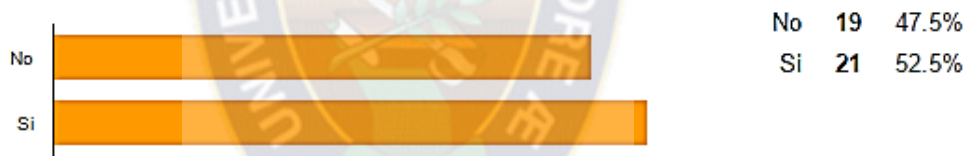


Figura 40: Conocimiento musical y composición
Fuente: Elaboración propia

- Facilidad de uso: en la (Figura 41), se observa que el 56% afirma que el uso del software es muy fácil e intuitivo de utilizar y un 45% afirma que el uso es fácil para usar. Esto demuestra la facilidad de uso es altamente sencilla y el uso de la aplicación no debe suponer una dificultad a la hora de ser usada por cualquier usuario.

¿Qué tan difícil fue utilizar el programa?

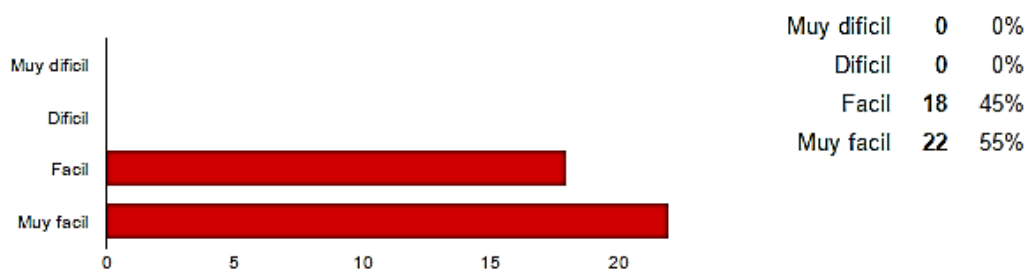


Figura 41: Facilidad de uso
Fuente: Elaboración propia

- **Fiabilidad de uso:** otro punto importante para validar la aplicación propuesta es verificar la fiabilidad, que básicamente es conocer si la aplicación funciona correctamente y sin presentar errores al momento de ser utilizada por cualquier usuario (Figura 42). Prácticamente el 100% de personas respondieron que nunca tuvieron problemas al momento de utilizar la aplicación, la que la convierte en altamente fiable para ejecutarse sin ningún problema.

¿El programa se equivocó en algún momento o dejó de funcionar?

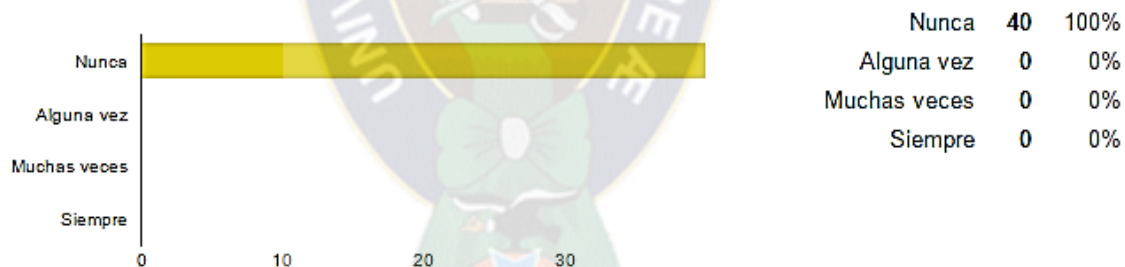


Figura 42: Fiabilidad de uso
Fuente: Elaboración propia

- **Predisposición de uso de la tecnología propuesta:** otro punto importante es aquel que permite conocer el interés de los entrevistados en la herramienta (Figura 43), para quizás diseñar un software completo para ser comercializado en un futuro o para algún otro propósito. Los resultados arrojan que todos los usuarios la utilizarían algún momento, siendo el desglose el siguiente: 5% para los que lo harían siempre, 55% los que la utilizarían muchas veces, 40% algunas veces.

¿Utilizarías el programa si lo tuvieras disponible?

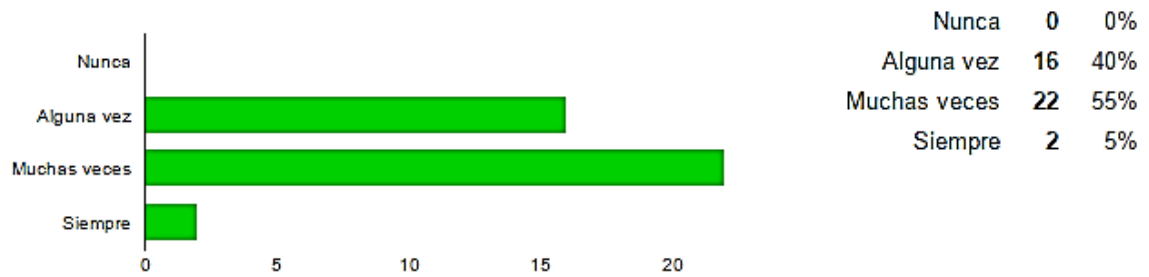


Figura 43: Predisposición de uso de la tecnología propuesta
Fuente: Elaboración propia

- Disponibilidad de productos similares en el mercado: es importante conocer que tan extendido es el conocimiento de este tipo de productos en nuestro medio. Los resultados obtenidos son por el no 72,5%, me da igual 22.5% y si 5% (Figura 44).

¿Conoces algún otro programa que componga música automáticamente?



Figura 44: Disponibilidad de productos similares en el mercado
Fuente: Elaboración propia

- Nivel de aceptación de las partituras generadas: es importante conocer la opinión de los usuarios acerca de la escritura en las partituras generadas (Figura 45). El 80% afirma que las partituras están correctamente escritas, el 17,5% desconoce el tema y solo el 2,5% piensa que no están bien.

¿Las partituras musicales que genera el prototipo están correctamente escritas?

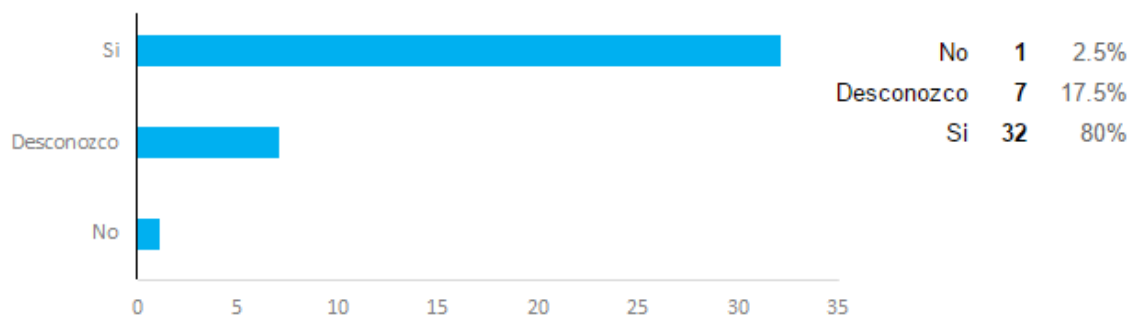


Figura 45: Nivel de aceptación de la escritura en las partituras
Fuente: Elaboración propia

- Nivel de aceptación de los fragmentos compuestos: finalmente se realizó una pregunta importante y vital para la investigación, se consultó a los usuarios su parecer en cuanto a la calidad del fragmento musical compuesto y si este sonaba agradable al oído, al ser reproducido (Figura 45). Esta información permite validar el prototipo en general.

¿Las melodías que compuso el programa te parecieron agradables para escuchar?



Figura 46: Nivel de aceptación y agrado de la melodía
Fuente: Elaboración propia

Los usuarios encuestados contestaron en un 87,5% que el fragmento musical monofónico compuesto era agradable al escuchar, 10% dijo que era poco agradable y 2,5% dijo que no. Si se toma en cuenta que la composición de los fragmentos es solamente monofónica, el nivel de aceptación es bastante alto.

CAPÍTULO 4

MARCO DE CONCLUSIONES

Resumen

Este capítulo hace hincapié a las conclusiones, estado de cumplimientos de objetivos, estado de cumplimiento de hipótesis, trabajos futuros y recomendaciones a las que arriba la presente investigación.

4.1 Conclusiones generales

El resultado de la presente investigación, propone un innovador modelo, para la composición de música por ordenador, el mismo está dirigido a los investigadores del área de inteligencia artificial especializados en el ámbito musical y a los músicos (empíricos o profesionales) que buscan otras herramientas y métodos para generar o componer música automáticamente. El modelo se orienta a la extracción de patrones musicales de melodías o fragmentos musicales existentes que mediante las cadenas de Markov generan matrices de transición de estados y mediante esa información, generar nuevas composiciones musicales.

Las cadenas de Markov demuestran en esta investigación, el gran poder y adaptabilidad de sus principios, propiedades y técnicas, en esta oportunidad acondicionada al desarrollo de modelos para el área musical.

En esta investigación se incluye el modelado y construcción de un prototipo de software que constituye una forma adecuada para experimentar la composición musical automática de fragmentos musicales monofónicos agradables al oído basado en el modelo de cadenas de Markov, el mismo puede ser modificado y adaptado de acuerdo a las necesidades y requerimientos propios de futuros investigadores del área.

Las herramientas utilizadas para construir el prototipo fueron, Java y JMusic, ambas han sido verdaderamente útiles y se ajustaron bastante bien a los

requerimientos del trabajo, permitiendo resolver los problemas que se han planteado. Sin embargo, la más utilizada fue JMusic, su empleo es bastante intuitivo, además dispone de una documentación extensa en la que se explican las partes, clases y demás utilidades de la librería, gracias a esta herramienta fue posible la lectura y escritura de archivos MIDI, además del análisis de información de los patrones musicales para construir las matrices de transición de estados requeridas en la investigación.

En mi opinión, aunque la implementación del modelo no ha sido tan sencillo, las composiciones realizadas por el prototipo no alcanzan una complejidad musical excesiva, quizás porque la música es algo intrínseco al ser humano, y aunque existan variedad de métodos y múltiples teorías armónicas que puedan ser plasmadas en algoritmos, la música no deja de tener un alto contenido emocional, espiritual y sensitivo, los cuales no estarán presentes en una máquina.

Por todo esto, hasta que no se consiga replicar un cerebro humano con máquinas, que incluya su forma de pensar, sentir, percibir las cosas y otros., no se podrá crear un compositor musical real, capaz de dar lugar a piezas comparables en espíritu y sentir, a las obras de los grandes músicos de la historia. Esto de ninguna forma quiere decir que no existen proyectos de composición musical automática muy avanzados y que generan música de alta calidad, pero estos siempre dependerán de reglas y pautas estrictas, de manera que generan música muy estructurada. Las máquinas nunca tendrán la espontaneidad de un ser humano que vive un agradable momento y comienza a tararear o silbar una melodía que inventa en ese instante.

Finalmente se concluye que los resultados de la investigación son satisfactorios, puesto que se consigue demostrar la hipótesis y cumplir los objetivos propuestos, además de implementar y plasmar todo el conocimiento adquirido mediante un prototipo funcional que compone ilimitadamente fragmentos musicales monofónicos.

4.1.1 Estado del cumplimiento de los objetivos

El objetivo principal *Utilizar el modelo de inferencia probabilística de las cadenas de Markov para diseñar un proceso que permita componer un fragmento musical de tipo monofónico*, se cumple con el desarrollo del modelo de Cadenas de Markov descrito en **Capítulo 3** en el punto **3.2** el cual desarrolla, detalla y ejemplifica todos los pasos aplicables para este fin.

Los objetivos secundarios y sus estados de cumplimiento se detallan a continuación:

- El objetivo secundario *Describir el proceso que implica la composición de un fragmento musical monofónico*, se cumple en el **Capítulo 3** en el punto **3.1** que es la descripción de un proceso para crear fragmentos musicales monofónicos.
- El objetivo secundario *Diseñar matrices de transición de estados en función a los patrones musicales extraídos de melodías o fragmentos musicales existentes*, se cumple en el **Capítulo 3** en el punto **3.2.2** donde especifica un proceso que en función de los patrones musicales, genera la matriz y el diagrama de transición de estados.
- El objetivo secundario *Analizar las probabilidades contenidas en la matriz de transición de estados para determinar el comportamiento correcto y necesario que facilite la composición de un fragmento musical monofónico*, se cumple en el **Capítulo 3** en el punto **3.2.3** que sintetiza el proceso de cadenas de Markov con el fin de utilizar la información disponible en las matrices de transición de estados para determinar los estados más apropiados que facilitan la composición de fragmentos musicales monofónicos.
- El objetivo secundario *Diseñar un prototipo funcional orientado a la composición de fragmentos musicales monofónicos agradables al oído*, se cumple en el **Capítulo 3** en todo el punto **3.3** donde se utiliza el Modelo en Cascada para establecer el orden de diseño del mismo, que inicia con la Fase

de Análisis de los Requisitos, pasando a la Fase de Diseño, luego a la Fase de Codificación y finalmente la Fase de Prueba y Validación donde específicamente la **Figura 46** muestra la validación que los usuarios hacen acerca del nivel de aceptación de los fragmentos compuestos por el prototipo en cuanto al agrado auditivo.

- El objetivo secundario *Diseñar una vista previa del fragmento musical compuesto, mediante una partitura musical*, se cumple simplemente analizando las características del prototipo, una de ellas es diseñar una vista previa del fragmento musical mediante su partitura, en la **Figura 39** se aprecia el resultado mediante una captura de la interfaz del prototipo, además se realiza una validación y nivel de aceptación sobre la correcta escritura de las partituras generadas, los resultados se aprecian en la **Figura 45**.

4.1.2 Estado de cumplimiento de hipótesis

La hipótesis de la presente investigación, dice: *El análisis del comportamiento de la frecuencia de uso de las notas musicales y la probabilidad e identificación de patrones musicales, permite generar matrices de transición de estados en las cadenas de Markov que formulan un modelo aplicable a la composición de fragmentos musicales monofónicos que son agradables al oído*, la misma se ha demostrado plenamente en el **Capítulo 3** en el punto **3.2 Modelo de cadenas de Markov aplicado a la composición de fragmentos musicales monofónicos**, donde se desarrollan paso a paso los mencionados procesos hasta conseguir la composición de un fragmento musical monofónico. Además, la demostración funcional de la hipótesis se complementa con el prototipo el cual fue analizado (punto **3.3.1**), diseñado (punto **3.3.2**), codificado (punto **3.3.3**) y validado (punto **3.3.4**) siguiendo los mismos principios del **modelo** en el punto **3.2**.

Para finalizar, el prototipo además de componer fragmentos musicales monofónicos, los hace “**agradables al oído**”, esto se puede corroborar en la **Figura 46** que le da de parte de los usuarios, validez y un alto nivel de aceptación

y agrado a las composiciones musicales realizadas, por lo tanto el prototipo cumple a cabalidad el fin para el que fue construido.

4.2 Recomendaciones

Para proseguir la investigación se recomienda:

- Incluir al almacén de melodías, elementos musicales de mayor extensión los cuales deben estar estandarizados en una sola tonalidad y ritmo, para disponer de mayor estabilidad, calidad y variabilidad en las composición de los fragmentos musicales.
- Realizar un análisis de patrones musicales más extensivo tomando en cuenta además de la melodía principal, el acompañamiento de los demás instrumentos musicales, con el propósito de añadir la opción de armonía musical y hacer posible componer fragmentos “polifónicos” estos fragmentos serian indudablemente de mayor agrado auditivo.
- Para implementar nuevas tareas o módulos para aumentar la complejidad del prototipo, se recomienda poseer conocimiento musical mínimamente intermedio o tener asesoramiento de un experto en el área.

4.3 Trabajos futuros

Las posibles ampliaciones de investigación que este proyecto permite son enormes, algunas que el lector puede tomar en cuenta son:

- Realizar el desarrollo e implementación del prototipo en otro tipo de plataformas, para dotar de alternativas al usuario final.
- Implementar módulos adicionales que permitan por ejemplo, seleccionar automáticamente la tonalidad, duración o la escala en la que se basará la composición, sin tener que definirlos como valores de entrada.
- Implementar una herramienta que permita extraer en forma automática la melodía principal o patrones musicales de diferentes formatos de audio como mp3, m4a, acc y otros. Ya que el realizar ese proceso es bastante moroso.

- Utilizar el modelo de cadenas de Markov, potenciado con algoritmos genéticos, redes neuronales u otro método de IA para que el mismo vaya aprendiendo con la experiencia y genere composiciones musicales de mayor calidad.
- Implementar la aplicación de este modelo de composición musical en videojuegos, páginas web, software o aplicaciones móviles con el fin de generar automáticamente música y ambientes sonoros de acuerdo a requerimiento, a su vez permitirá reducir el tamaño en disco de estas aplicaciones al omitir los archivos de audio que estas incorporan.



REFERENCIAS

- Alsina, P., & Sese, F. (1994). *La música y su evolución*. Recuperado de <https://books.google.es/books?id=HydU3ZwMeKEC>
- Basharin, G., Langville, A., & Naumov, V. (2004). *The Life and Work of A. A. Markov*. Recuperado de: <http://www.maths.tcd.ie/~nhb/talks/Markov.pdf>
- Berdu, D. (2012). Un genio artificial, al servicio de la música. España: El País. Disponible en: http://cultura.elpais.com/cultura/2012/11/09/actualidad/1352489750_968658.html
- Brown, A. (2009). *Making Music with Java*. Recuperado de; <http://www.lulu.com/content/e-book/making-music-with-java/9987621>
- Catucci, S. (2005). *La historia de la música: sonidos, instrumentos, protagonistas*. Barcelona: Malsinet.
- Castillo, E., Gutierrez, J. & Hadi, A. (1998). *Sistemas Expertos y Modelos de Redes Probabilísticas*. Madrid: Academia Española de Ingeniería.
- Chamorro, J. (2009). *Lenguaje musical preparatorio 1*. Barcelona: Taller de músics. S.L.
- Delgado, M. (2010). *El lenguaje musical (Vol. II)*. España.
- Del Valle, J. (2015). Introducción a las Cadenas o Procesos de Markov. Disponible en: http://www.ingenieria.unam.mx/javica1/ingsistemas2/Simulacion/Cadenas_de_Markov.htm
- D'Indy, V. (1912). *Composition Musicale*. Paris: Durand.
- De Candé, R. (2002). *Nuevo diccionario de la música vol. I*. Editorial Grasindo.
- De Pedro, D. (2014) *Teoría completa de la música - Vol.1 (Edición revisada)*. Madrid: Grupo Real Musical.
- Edwards, A. (1956). *The Art of Melody*. Philosophical Library.
- García, A. (2012). *Inteligencia Artificial. Fundamentos, práctica y aplicaciones*. Editorial RC Libros.
- Galbiati, Jorge (2004). *Desarrollo histórico de la estadística*. Recuperado de: http://www.jorgegalbiati.cl/ejercicios_4/HistoriaEstadistica.pdf
- Hernández, R., & Fernández, C. (1997). *Metodología de la investigación*. México: Editorial McGRAW – HILL

- Huerta, J. (2005). *Procedimiento para redactar y validar los cuestionarios para los estudios de investigación y evaluación*. Puerto Rico: Universidad de Puerto Rico. Recuperado de: <http://academic.uprm.edu/jhuerta/HTMLobj-127/GUIAS1.pdf>
- Huber, D. (1991). *The MIDI Manual*. Indiana: SAMS.
- Imbernön, D. (2010). *Como Ser Teclista de Metal Y No Morir en El Intento*. Recuperado de: https://books.google.es/books?id=z_XdAgAAQBAJ
- Isava, L. (2010). Refracción V: De música un caso inaudito de fono-centrismo. *Unirioja DialNet*. Recuperado de <http://www.dialnet.unirioja.es/download/articulo/3645646.pdf>
- Juriquilla, & Querétaro (2011). Prepara alumno de la Unam una orquesta virtual para estrenar un concierto contemporáneo. México: Boletín UNAM-DGCS-467. Disponible en: http://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2011_467.html
- Michels, U. (1977). *Atlas de música, I*. Madrid: Alianza editorial.
- Moldaver, E., Merlino, H., & Fernández, E. (2014). Composición Musical a Través del Uso de Algoritmos Genéticos. *Revista Latinoamericana de Ingeniería de Software*, 2(3). Recuperado de <http://sistemas.unla.edu.ar/sistemas/redisla/ReLAIS/relais-v2-n3-149-156.pdf>
- Nietzsche, F. (1998). *El ocaso de los ídolos*. Barcelona: Tusquets Editores.
- Latham, A. (2008). *Diccionario enciclopédico de la música*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Paulus, D., Hornegger, J. (1998). *Applied Pattern Recognition (2° edition)*. Vieweg.
- Peña, F. (2009). *Inteligencia artificial y arte*. Recuperado de http://www.cs.upc.edu/~bejar/ia/material/trabajos/IA_y_Arte.pdf
- Pino, R., Gómez, A. & Abajo, N. (2001). *Introducción a la inteligencia artificial: sistemas expertos, redes neuronales artificiales y computación evolutiva*. Recuperado de: <https://books.google.es/books?id=RKqLMCw3IUkC>
- Puerto, J. (2008). Modelos Estocásticos de la I.O. II. *España: Universidad de Sevilla*. Recuperado de: https://grupo.us.es/gpb97/curri_sevilla/doc/meio2.pdf
- Quiroz, T. (2011). *Aplicaciones no convencionales de cadena de Markov*. Recuperado de: http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/1248/quiroz_martinez_telmo_aplicaciones_no_convencionales_cadena_markov.pdf

- Raphael, C. (2010). *Christopher Raphael's music plus one*. Recuperado de: http://www.music.informatics.indiana.edu/~craphael/music_plus_one/what.html
- Randel, D. (2003). *The Harvard Dictionary of Music*. EE.UU. Harvard University Press,
- Raso del Molino, J. (2000). La armonía. *Revista de Música Culta*, 1(1). Recuperado de <http://www.filomusica.com/filo1/jr.html>
- Reynoso, R. [s.a.]. Introducción a la armonía tradicional (i.a.t.), Recuperado de <http://akamai.www.berkleemusic.com/assets/display/8214291/8214290.pdf>
- Riccò, D. (2014). *Los fundamentos teóricos, artísticos y científicos: Segunda edición ebook ampliada y mejorada*. Recuperado de: <https://books.google.es/books?id=VDfKBAAAQBAJ>
- Rojas, R., Boucchechter, I. (2005). *Ciclos de Vida de Ingeniería del Software*. Recuperado de: www.naturastock.com/rsdotnet/iic3140/materia/cascadaymodelov.pdf
- Romero, J., & Dafonte, C. (2007). *Inteligencia artificial y computación avanzada*. Santiago de Compostela: Fundación Alfredo Brañas.
- Sag, L. (2009). *Origen de la música*. Recuperado de: http://www.csi-csif.es/andalucia/modules/mod_ense/revista/pdf/Numero_23/LYDIA_SAG_LEGRA_N01.pdf
- Sánchez, A., Pantrigo, J. & Pérez, J. (2010). Extracción de líneas melódicas a partir de imágenes de partituras musicales. Recuperado de: www.escet.urjc.es/~jjpantrigo/papers/partiturasCMPI06.pdf
- Shan, M., & Chiu, S. (2010). *Algorithmic compositions based on discovered musical patterns. Multimedia Tools Appl.* Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.1007/s11042-009-0303-y>
- Simberg, A. (1992). *Los obstáculos de la creatividad*. General Motors Corporation.
- Toch E. (1989). *La melodía*. Barcelona: Editorial Labor S.A.
- Weiss, S., & Kulikowski, C. (1984). *Sistemas Expertos*. Prentice-Hall
- Weinberg, G., Driscoll, S., & Parry, M. (2006). *Haile-An Interactive Robotic Percussionist*. Recuperado de: <http://home.cc.gatech.edu/parry/uploads/1/ICMC2005.pdf>

ANEXOS

Anexo A

Fragmentos musicales compuestos, siguiendo pasos de composición

En el anexo se aprecian partituras de fragmentos musicales resultantes, creados simplemente poniendo en práctica los pasos y consejos para componer un fragmento musical descritos en la investigación.

Melodía alegre



Melodía 2



Anexo B

Algunos fragmentos pertenecientes al almacén de melodías.

Este anexo muestra la estructura musical y comportamiento de algunos fragmentos musicales existentes, de los cuales se extraen sus características musicales para ser cargados en el prototipo como parte del repositorio (almacén de melodías).

- **Escalas Mayores**
 - Melodía 1



Nota	pitch	rythm	dynamic
C5	60	C	60
G4	55	EN	60
E4	52	EN	90
A4	57	C	100
G4	55	C	90
C5	60	EN	70
D5	62	EN	70
C5	60	EN	70
G4	55	EN	70
A4	57	C	70
C5	60	C	100
G4	55	C	70
E4	52	EN	60
C4	48	EN	100
D4	50	C	80
C4	48	C	70
E4	52	EN	90
C4	48	EN	80
D4	50	EN	80
G4	55	EN	70
C5	60	C	70
C4	48	C	90

- o Melodía 2



Nota	pitch	rythm	dynamic
C4	48	EN	100
D4	50	EN	70
E4	52	EN	80
C4	48	EN	80
C4	48	EN	100
E4	52	EN	80
G4	55	C	80
A4	52	EN	70
G4	55	EN	90
D5	62	EN	60
G4	55	EN	100
C5	60	C	90
D4	50	C	80
C4	48	EN	90
E4	52	EN	80
G4	55	EN	70
C4	48	EN	60
C4	48	EN	90
D4	50	EN	70
E4	52	C	100
C4	48	EN	100
G4	55	EN	100
A4	57	EN	60
G4	55	EN	90
D5	62	C	60
C5	60	C	60

Al inicio de ambos casos se muestran partituras de fragmentos musicales pertenecientes a una escala mayor, de estos se extraen los valores de las características de: pitch (tono), rythm (ritmo) y dynamic (dinámica), mismos que figuran en la tabla, para posteriormente, utilizar dichos valores en el análisis y extracción de los patrones musicales que permitirán generar una matriz de transición de estados.

- Escalas Menores



Nota	pitch	rythm	dynamic
C5	60	C	80
B4b	58	EN	70
A4b	56	EN	70
G4	55	C	100
B4	59	C	90
C5	60	C	70
F4	53	M	90
G4	55	C	80
C5	60	C	70
A4	57	M	90
B5	59	C	60
D5	62	M	100
C5	60	M	80

Para esta melodía se realiza el exactamente el mismo procedimiento anterior, cabe hacer notar que esta melodía ahora se encuentra en una escala menor.

Anexo C

Partituras de fragmentos musicales monofónicos compuestos por el prototipo

En este anexo, se muestra las partituras de tres fragmentos musicales monofónicos que fueron compuestos utilizando el software prototipo

- **Escala: A Mayor**

♩ = 120

7

Detailed description: This block contains the musical notation for the A Major scale fragment. It consists of two staves of music in treble clef, 4/4 time signature, with a tempo marking of quarter note = 120. The first staff contains measures 1 through 6, and the second staff contains measures 7 through 12. The key signature has two sharps (F# and C#). The melody is a simple scale: A4, B4, C#5, D5, E5, F#5, G#5, A5, A5, G#5, F#5, E5, D5, C#5, B4, A4.

- **Escala: G menor**

♩ = 110

8

14

20

29

Detailed description: This block contains the musical notation for the G minor scale fragment. It consists of five staves of music in treble clef, 4/4 time signature, with a tempo marking of quarter note = 110. The first staff contains measures 1 through 6, the second staff contains measures 7 through 13, the third staff contains measures 14 through 19, the fourth staff contains measures 20 through 25, and the fifth staff contains measures 26 through 31. The key signature has two flats (F and C). The melody is a simple scale: G4, A4, Bb4, Cb5, D5, Eb5, Fb5, G5, G5, Fb5, Eb5, D5, Cb5, Bb4, G4.

- Blues en G Mayor

♩ = 125

6

11

17

23

29

Anexo D

Encuesta de valoración del prototipo producto software

Marque solamente una opción por pregunta

¿Tienes conocimiento en teoría musical, sabes tocar algún instrumento musical o cantar?

- No
- Muy poco
- Si

¿Tienes composiciones musicales propias?

- No
- Si

¿Qué tan difícil fue utilizar el programa?

- Muy difícil
- Difícil
- Fácil
- Muy fácil

¿El programa se equivocó en algún momento o dejó de funcionar?

- Nunca
- Alguna vez
- Muchas veces
- Siempre

¿Utilizarías el programa si lo tuvieras disponible?

- Nunca
- Alguna vez
- Muchas veces
- Siempre

¿Conoces algún otro programa que componga música automáticamente?

- No
- Me da igual
- Si

¿Las partituras musicales que genera el prototipo están correctamente escritas?

- Desconozco
- No
- Si

¿Las melodías que compuso el programa te parecieron agradables para escuchar?

- No
- Poco
- Si

