

CAPITULO 2

Marco Teórico

2.1 La Música y su Contexto

En realidad pocos conceptos son cambiantes, difusos e imprecisos los que se pueden encontrar en general, pero uno de ellos, y sin duda alguna, es la música.

La música es un arte del tiempo o dinámica, esto en contraste con la pintura o la escultura, las cuáles se encuentran clasificadas como artes del espacio o plásticas.

Los sonidos en la música se producen de una forma determinada, no con una precisión exacta, puesto que la ejecución humana nunca será precisa, pero sí se necesita de ésta para que los sonidos tomen forma, y así, la obra musical, obedeciendo un orden y una razón.

La música es una forma de expresión abstracta, ya que mediante símbolos se identifican sonidos que corresponden y tienen un significado en específico, por otro lado, ésta puede ser interpretada de diferentes formas, ya que cada persona tiene un criterio propio. Sin embargo, también es una habilidad que no siempre puede ser desarrollada por toda la gente o por una mayoría. Es una de las razones por lo que se trabaja en este proyecto, ya que es una forma en la que sin tener conocimiento ni habilidad para la música, puede ser ejecutada de manera “automatizada” con la ayuda de una herramienta como lo es la computadora, generando y ejecutando nuevas obras musicales.

Conceptos Musicales.




Es necesario, que de manera breve se explique la notación y escritura de las notas musicales. Como tres elementos básicos a dar a conocer en este documento, se tiene: a) el pentagrama, b) la clave y c) notas musicales. Serán mencionados más signos, pero esto no quiere decir que son todos los existentes, ya que el mundo de la música es muy extenso y complejo. En este proyecto se expondrá solo lo necesario para dar una idea general del mismo.

2.1.1 Pentagrama

El pentagrama se compone de 5 líneas horizontales, paralelas y equidistantes donde se escriben los signos musicales [21], y no solo estos, sino muchos más. Dependiendo del espacio o línea en la que se encuentre una figura musical es el nombre que recibe, la cual está en función de la clave que se utilice.

2.1.2 Clave

La clave es el signo que se escribe al principio de cada pentagrama y tiene la función de dar nombre a las notas dependiendo de la altura de éstas. Son usadas tres claves:

Clave de Sol:	
Clave de Fa:	
Clave de Do:	

La colocación de cada una de éstas es diferente en el pentagrama; por otro lado, la clave de Fa y la clave de Do se pueden utilizar en diferentes posiciones, dos posiciones para la primera y cuatro para la segunda, dándoles a las figuras musicales diferentes nombres.

2.1.3 Notas Musicales

La representación de los sonidos de las notas musicales se hace mediante su colocación en el pentagrama y los valores de cada una de ellas se representan mediante su figura [21]. Las notas musicales se diferencian una de otra por su nombre y posición en el pentagrama.

La clave da nombre a la nota escrita en la línea donde está ella, y las notas restantes toman el nombre ascendente o descendente.



Figura 2.1 Nombre de notas musicales en Clave de Sol

Para dar nombre a las notas en clave de Fa se hace una transposición a una 3ra. mayor alta, entonces el Do de la Figura 2.1 debe cambiar por un mi en clave de Fa en 4ta línea. Sin embargo, si comparamos la Figura 2.1 con la Figura 2.2 encontramos que un La en clave de Sol, debe cambiarse por un Do en clave de Fa, es decir, que los nombres de las notas cambian quedando de la siguiente manera:



Figura 2.2 Nombre de notas musicales en Clave de Fa

2.1.4 Figuras Musicales

Son símbolos que nos indican la duración de las notas musicales. Hay 7 figuras de notas. Una figura de nota dura la mitad del valor de la figura inmediata superior, y el doble de la inmediata inferior.








	Unidad (Redonda)
	Mitad (Blanca)
	Cuarto (Negra)
	Octavo (Corchea)
	Dieciseisavo (Doble Corchea)
	Treintaidosavo (Triple Corchea)
	Sesentaicuatrosavo (Cuadruple Corchea)

Figura 2.3 Figuras Musicales

2.1.5 Alteraciones

Las alteraciones son los signos que se escriben a la izquierda de las notas y sirven para modificar su entonación. Estas aumentan o disminuyen en un semitono al sonido que acompañan, entonces entre Do y Re, donde hay un tono de diferencia, la nota intermedia se llama Do # (Do sostenido) o Re b (Re bemol). A continuación se muestran los semitonos existentes.

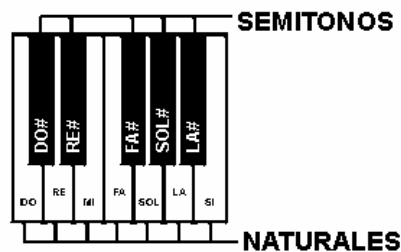


Figura 2.4 Alteraciones

Las principales alteraciones son:

Sostenido:	#
Bemol:	b
Becadro:	q

2.1.6 Compases

Son fracciones que se colocan al principio del pentagrama y que dividen el tiempo de la pieza musical en partes iguales. El compás nos da las pautas y marcas del tiempo que debemos usar al interpretar rítmicamente la pieza musical.

Los compases se clasifican según su división en tres grupos: Binarios, ternarios y cuaternarios, y se representan con una fracción, donde el dividendo indica las partes en las que se divide el compás, y el divisor el valor de cada parte. Como ejemplo tenemos 4/4, esto es, que el compás se divide en cuatro partes. Cada parte vale una cuarta de la redonda, es decir una negra.

2.1.7 Tonalidad y Armadura

Es un grupo de sonidos que forman un sistema y están regidos por una nota principal llamada tónica. La tonalidad se define en una pieza musical, a partir de la escala y acordes que se utilicen. Para saber la tonalidad de una obra es suficiente con ver la armadura, que es el grupo de alteraciones que acompañan a la clave al principio de la pieza musical. Podemos encontrar estas alteraciones, todas sostenidos o todas bemoles, éstas se pueden encontrar en el siguiente orden:



Figura 2.5 Tonalidades

La tonalidad puede tener dos modalidades, mayor y menor. Modalidades que quedan definidas por la escala mayor o menor que use respectivamente.

Lo anterior es una breve explicación, desarrollo y nombramiento de los principales signos que se utilizan en la música, con la finalidad de que el proyecto no resulte de difícil comprensión. Básicamente, las obras a generar están en tonalidades de Do mayor (para minuetos) y Re mayor y Sol Mayor (para el combinatorio de minuetos y tríos respectivamente), los compases están escritos en clave de sol y fa en cuarta línea; finalmente, las notas musicales y sus figuras difieren unas de otras, dando una coherencia y armonía a cada compás que es escuchado.

2.2 Música y Matemáticas

La música no son solo signos, también son matemáticas. Una parte de las matemáticas estudia los números, sus patrones y formas, elementos que son inherentes a la ciencia, la composición y la ejecución de la música. Por otra parte cuando llegamos a encontrar esta relación entre una y otra ello no impide que se hayan desarrollado de forma independiente.

El mundo actual difícilmente sería concebido sin las matemáticas, ya que muchos de los inventos y tecnologías desarrolladas hasta el día de hoy son debido a las matemáticas. La música podría parecer inútil; sin embargo, está cargada de emociones, trasmite estados

de ánimo como tristeza, alegría, puede ser suave o agresiva, espiritual o religiosa, pero no se puede hablar de un teorema “triste” o de una demostración “agresiva”.

Tanto los matemáticos como los músicos centran su tiempo en resolver problemas o componer e interpretar, respectivamente, pero quizás ninguno se da cuenta de que están completamente entregados a disciplinas que son paradigmas de lo abstracto.

Ambas disciplinas tienen aspectos que las distinguen de muchas otras, debido a que se tiene que tener cierto grado de iniciación para introducirse en la lectura de una partitura, así como para seguir la demostración de un teorema. La escritura, que es capaz de indicarnos tiempos, ritmos y altura de los sonidos como notación en la música; o, una numeración tan sofisticada como la arábica y notaciones tan desarrolladas que dan estructura y sentido a los conceptos [27].

Así como estas disciplinas tienen algo que las distinguen una de otra, no lo es así con la aparición de cada una de ellas. Ambas nacen por necesidades del hombre. Las matemáticas nacen por la necesidad de registrar el paso del tiempo y las observaciones del cielo, en un principio, éstas consistieron en números y conteos; más tarde se necesitaba llevar registro de las cosechas, del ganado y de las operaciones de comercio, así fue como se desarrollaron signos y palabras para los números. Por otra parte, se tiene idea de que las primeras expresiones de música se hicieron en la prehistoria debido a descubrimientos que se hicieron en cuevas y tumbas; este arte nace de la necesidad de protegerse de ciertos fenómenos naturales, de alejar a los espíritus malignos, de atraer la ayuda de los dioses, de honrarlos, festejar y celebrar el cambio de las estaciones [16].

2.2.1 Relación en la Antigüedad

Se cree que la figura legendaria de Pitágoras nació en la isla de Samos, actualmente Turquía, alrededor del año 580 antes de Cristo. Se dice que Pitágoras acuñó la palabra matemáticas, que significa “lo que es aprendido”. El pensamiento de este célebre y el de sus seguidores fue altamente respetado por sus ideas filosóficas y religiosas durante los siglos VI y V A. de C. en Grecia y el Sur de Italia. Pitágoras se centra en describir un sistema de ideas que busca unificar los fenómenos del mundo físico y del mundo espiritual en términos de números, en particular, en términos de razones y proporciones de enteros. Se descubrió un sonido al que llamaban “La música de las esferas”, el cual provenía de las órbitas de los cuerpos celestiales que giraban alrededor de la Tierra, produciendo de esta forma sonidos que armonizaban entre sí.

Pitágoras estudió la naturaleza de los sonidos musicales. La música griega existía ya tiempo atrás, era esencialmente melódica más que armónica y era microtonal, es decir, su escala contenía muchos más sonidos que la escala de doce sonidos del mundo occidental. Esto no es algo inusual en las tradiciones musicales orientales, donde la música es enteramente melódica. Los intervalos más pequeños no se pueden escribir en la notación actual aunque algunos cantantes modernos e instrumentistas de jazz los ejecuten [4].

Pitágoras descubrió que existía una relación numérica entre tonos que sonaban “armónicos” y fue el primero en darse cuenta de que la música, siendo uno de los medios esenciales de comunicación y placer, podía ser medida por medio de razones de enteros. Se sabe que el sonido producido al tocar una cuerda depende de la longitud, grosor y tensión de la misma. Cualquiera de estas variables afecta la frecuencia de vibración de la cuerda. Lo que Pitágoras descubrió es que al dividir la cuerda en ciertas proporciones era capaz de producir sonidos placenteros al oído [20].

Encontró también, que al dividir una cuerda a la mitad producía un sonido que era una octava más aguda que el original, de un Do_4 a un Do_5 , siendo el Do_4 el original a tocar y el Do_5 el de la octava siguiente, en música el Do central, llamado así por encontrarse en el centro de un teclado, es llamado Do_4 , las octavas restantes son numeradas ascendentemente para los agudos y descendentemente para los graves. Por otra parte cuando la razón era 2:3 se producía una quinta, distancia recorrida entre un Do y un Sol en la misma octava, y que otras razones sencillas producían sonidos agradables.

La razón por la cual a estos intervalos se les encuentra más agradables que a otros se debe, principalmente, a la física de la cuerda tocada. Cuando una cuerda de 36 cm. se rasga, no sólo se produce una onda de 36 cm., sino que además se forman dos ondas de 18 cm., tres de 12, cuatro de 9, y así sucesivamente. La cuerda vibra en mitades, tercios, cuartos, etc. Cada vibración subsidiaria produce armónicos, estas longitudes de onda producen una secuencia de armónicos de un medio, un tercio, un cuarto, etc. de la longitud de la cuerda. Los sonidos son más agudos y mucho más suaves que el sonido de la cuerda completa, llamada fundamental, donde generalmente no son percibidos por cualquier persona, pero lo anterior también distingue a un instrumento musical de otro, pues éstos suenan diferente. Por otro lado, la diferencia también se hace notar dentro del mismo instrumento, ya que Do y Sol, a una distancia de quinta, comparten muchos de los mismos armónicos, éstos sonidos se mezclan produciendo un resultado agradable.

Sin embargo, Pitágoras no contaba con conocimiento alguno sobre armonías. Él sólo sabía que la longitud de la cuerda con las razones 1:2 y 2:3 producía combinaciones de sonidos agradables y construyó una escala a partir de estas proporciones. En sus experimentos, Pitágoras descubrió tres intervalos que consideraba consonantes: el diapasón, el diapente y el diatesarón. Los llamamos la octava, la quinta y la cuarta porque

corresponden al octavo, cuarto y quinto sonidos de la que se conoce como escala pitagórica diatónica. La quinta es llamada de esa forma, debido a que corresponde a la quinta nota de la escala.

Los pitagóricos, quienes se dedicaban al estudio de la naturaleza de los sonidos y las matemáticas, carecían de información acerca de ondas sonoras, frecuencias y de cómo la anatomía del oído afecta la altura de un sonido. En realidad, la regla que establece que la frecuencia está relacionada con la longitud de la cuerda no fue formulada sino hasta el siglo XVII, cuando el franciscano Fray Marín Mersenne definió algunas reglas sobre la frecuencia de una cuerda vibrando [16].

Una de las enseñanzas clave de la escuela pitagórica era que los números lo eran todo, y nada se podía concebir o crear sin éstos. Había un número especialmente venerado, el 10, al igual que la tetractys, siendo la suma de 1, 2, 3, y 4. La tetractys era el símbolo sagrado de los pitagóricos, un triángulo de cuatro hileras representando las dimensiones de la experiencia. La noción pitagórica puede ser dada con una equivalencia algebraica moderna [18], la cual se muestra a continuación, ésta es extensa por lo que no se hace explícita en este documento.

1 punto	•	$(n^0 = 1)$
2 línea	••	AB
3 plano	•••	A^2ABB^2
4 sólido	••••	$A^3A^2BAB^2B^3$

En el caso de la música, simbolizaba las proporciones entre las notas, empezando por la proporción 1:2 para la octava y así sucesivamente en proporciones para las siguientes dimensiones.

La armonía de las esferas proviene de esta numerología musical que llegó también a influir en el modelo planetario de Kepler (1571-1630) unos 2,000 años más tarde. Los experimentos de Pitágoras con el monocordio, el cual era una caja rectangular de madera, con una sola cuerda y, una clavija que permitía alargar o acortar la cuerda según los correspondientes intervalos armónicos grabados en la caja; la cuerda era tocada con un plectro o con los dedos. Los experimentos con este elemento llevó a un método de afinación, con intervalos en razón de enteros, conocido como la afinación pitagórica. La escala producida por esta afinación se llamó escala pitagórica diatónica y fue usada durante muchos años en el mundo occidental. Se deriva del monocordio, y de acuerdo con la doctrina pitagórica, todos sus intervalos pueden ser expresados como razones de enteros. Existen diferencias de afinación entre esta escala y la escala temperada usada actualmente.

En la época de los antiguos griegos, los pitagóricos desarrollaron una división del currículum llamado *quadrivium* en donde la música se consideraba una disciplina matemática que manejaba relaciones de números, razones y proporciones. Esta división se mantuvo durante la Edad Media, por lo que era necesario el estudio de ambas disciplinas. El *quadrivium*, que comprendía la aritmética, música, geometría y astronomía, con la adición del *trivium*, el cual comprendía la gramática, retórica y dialéctica, se convirtieron en las siete artes liberales, pero la posición de la música como un subconjunto de las matemáticas permaneció durante la Edad Media [15].

Un ejemplo claro de personajes que escribieron sobre Matemáticas y música durante el período clásico, sin duda alguna se encuentra Euclides, quien se cree que escribió el primer libro de Elementos de Euclides, el cual es de origen Pitagórico y fue la base del estudio de matemáticas; por otra parte, también escribió sobre música. Como otro ejemplo se tiene a Arquitas, uno de los más brillantes pitagóricos, quien escribió tratados de

geometría sólida y también es autor de un tratado titulado “Sobre la Música”. Nicómano, personaje que en el año 100 D. de C. produjo “Introducción a las matemáticas” e “Introducción a la geometría”, tratados ambos; y que en adición a ello escribió también “Introducción a la música” y un tratado de armonía, se encuentra como autor dentro del periodo clásico. Este último personaje define la aritmética como cantidad absoluta y la música como cantidad relativa, habla sobre la importancia de las razones de enteros en su Teoría de la música [16, 20, 17].

2.2.2 Edad Media y Renacimiento

La tradición pitagórica fue propiciada por Severino Boecio (480-524), filósofo y matemático, cuyos textos de matemáticas fueron usados por siglos. Nacido en Roma en el siglo V, fue el principal traductor de la teoría de la música en la Edad Media. Escribió “Principios de la Música”, interpretando los trabajos de Nicómaco, Ptolomeo y Euclides. Él creía que la música y las proporciones que representaban los intervalos musicales estaban relacionadas con la moralidad y la naturaleza humana y prefería las proporciones pitagóricas. Escribió además varias obras originales: sobre las cuatro artes del *Quadrivium*, de las que se conservan las referentes a aritmética y música “*De institutione arithmetica* y *De institutione musica*”, escritas entre los años 500-505.

Johannes Kepler, astrónomo y matemático alemán nacido en el año de 1571, contribuyó al descubrimiento por Newton de la gravitación universal debido a sus tres leyes del movimiento. En *Mysterium Cosmographicum* (1596) interpreta no solo a la geometría, sino a la armonía musical como revelaciones de la ley divina. Reconociendo que los planetas giraban alrededor del sol, refinó la teoría de la “La música de las esferas” de los pitagóricos, sugiriendo que los planetas producirían diferentes sonidos por los diferentes

grados de velocidad a la que giraban. Creía que si se conocía la masa y la velocidad de un objeto que giraba se podría calcular su sonido fundamental. Más tarde en el año de 1619, en *Harmonies Mundi Libri V*, se reinterpreta la armonía musical. Los estudios matemáticos del movimiento de los planetas, llevaron a dar una notación racional de la música, confirmando que la música desarrollada a partir de este estudio, era la “verdadera música”, polifónica y no sólo una escala estática como se había afirmado en años atrás por diferentes escritores. Desarrolló sonidos correspondientes a los planetas entonces conocidos. En su teoría neopitagórica de las matemáticas detrás del universo, sus explicaciones físicas de las vibraciones y su implicación en la armonía universal lo llevaron a la convicción de que la fuente de la respuesta humana a la música debe buscarse en el alma y el intelecto y no en la materia física [14].

2.2.3 Serie de Fibonacci

Esta serie provee numerosos ejemplos de la relación entre música y matemáticas. Estos números son elementos de una serie infinita nombrada así por Fibonacci, matemático medieval quien nació en el año de 1170 después de Cristo y cuyo nombre verdadero era Leonardo Pisano Fibonacci. Su figura es importante debido a que introdujo en Europa la notación arábica sustituyendo a la romana.

El primer número de esta serie es 1, y cada número de la serie es el resultado de la suma de los dos anteriores. La serie toma el siguiente aspecto:

0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, ...

Esta serie posee propiedades muy interesantes, entre las cuales se destaca la relación existente entre los números que la componen.

- La razón de los números que son consecutivos de la serie, es decir, $1/1$, $1/2$, $2/3$, $3/5$, $5/8$, $8/13$, etc., tiende a tener como resultado al decimal 0.618.
- La razón de los números no consecutivos de la serie, es decir, $1/2$, $1/3$, $2/5$, $3/8$, $5/13$, $8/21$, etc., tiende a tener como resultado al número 0.382.
- La razón de cualquier número de la serie al siguiente número más bajo, es decir, $21/13$, $13/8$, $8/5$, etc., tiende a tener como resultado el número 1.618, que es el inverso de 0.618.
- La razón de cualquier número de la serie al siguiente número más bajo no consecutivo, es decir, $21/8$, $13/5$, $8/3$, etc., tiende a tener como resultado el número 2.618, que es el inverso de 0.382.

La proporción de estas razones, sea en fracción o en decimal, es considerada por muchos como atractiva a la vista, balanceada y bella, y es nombrada proporción (sección) áurea.

Debido a que la proporción áurea es estéticamente atractiva se usa ampliamente en el arte y en la arquitectura. Muchos elementos de la naturaleza se desarrollan en esta proporción, las vueltas del caracol, los cuernos del cimarrón, la forma en que nacen las ramas y hojas de ciertas plantas, etcétera.

Las superficies se dividen para obtener la proporción áurea, dando lugar a una composición balanceada y armónica. Los números de la serie se utilizan debido a que es una manera fácil de lograr la proporción áurea. La cual no sólo es agradable a la vista, sino al oído también.

No se sabe si el uso de la serie es intencional o de manera intuitiva, tal vez el compositor la usa sin saber, sólo porque se oye bien. Por ejemplo, Beethoven no sólo la

emplea en el tema de su Quinta Sinfonía, sino además en la forma en que incluye este tema en el transcurso de la obra, separado por un número de compases que pertenece a la serie. El compositor húngaro Béla Bartók utilizó esta técnica para el diseño de sus composiciones. La utilizó para desarrollar una escala que denominó la escala Fibonacci [15].

2.2.4 La Melodía con Influencia de las Matemáticas

En la composición de una pieza musical existe una estructura que está influida por las matemáticas, en algunas ocasiones más obvias que en otras.

Un procedimiento básico para obtener cohesión en una pieza musical es la reafirmación de una secuencia de sonidos una y otra vez, en forma variada para evitar la monotonía y dar carácter a la composición. Se debe hacer de tal manera que resulte placentera al oído y de interés a la mente. Si estas variaciones son bien elaboradas, éstas ayudarán a que la pieza musical se recuerde más fácilmente; de esta forma se hará más atractiva, ya que el reconocer frases repetitivas es importante para el placer musical. Algunas de las técnicas usadas para dar unidad a una composición, sin hacerla aburrida, están basadas en el plano geométrico.

Las transformaciones musicales están íntimamente relacionadas con las transformaciones geométricas básicas. Una transformación geométrica recoloca una figura geométrica rígida en el plano, preservando su forma y tamaño. La forma original no se distorsiona con la manipulación. Así, una frase musical tendrá motivos que se repiten en forma idéntica o se repiten en forma más aguda o más grave; en otras ocasiones, en vez de ascender descienden o retroceden.

Rotación, traslación y reflexión, son transformaciones geométricas que se encuentran en la mayoría de las melodías populares, y un análisis de las obras maestras musicales lo demuestran, no hay una obra que no cuente con esta característica. Ésta se da a notar desde las obras de Bach, Mozart, Beethoven, etc. sin excluir a los Beatles o cualquier otra canción. Las transformaciones geométricas son un recurso muy utilizado aunque normalmente no es asociado con las matemáticas, la forma más sencilla de aplicar la traslación a la música es la repetición.

2.3 MIDI y su contexto

MIDI en sus siglas significa *Musical Instrument Digital Interface*. La historia de MIDI es muy extensa en la actualidad. De forma general, las interfaces MIDI y las versiones del formato MIDI tienen como abuelos a los sintetizadores y a los samplers. Los sintetizadores eran aparatos que tenían como interfaz un teclado, producían sonidos extraños y eran programables. Los samplers son aparatos que muestrean (graban) audio. Estos últimos pueden muestrear una nota que está almacenada en memoria RAM o en discos flexibles para después reproducir la nota o sonido. Actualmente las interfaces, los teclados y el software MIDI son muy comunes y sirven para aprovechar al máximo la tecnología digital en música.

Tiempo después de que la especificación de MIDI fue creada, se empezaron a desarrollar los secuenciadores, el hardware en desarrollo se centraba en ello. Estos secuenciadores funcionan como grabadoras, ya que los músicos al tocar una canción en un teclado, y si el puerto de salida de MIDI está conectado, éste envía los datos directamente al secuenciador para registrar la canción. El músico, entonces, con solo presionar el botón de

reproducción la música se ejecuta exactamente como la original. Este hecho fue de gran ayuda y avance para los músicos, ya que en años atrás al componer obras tenían que reunirse con los músicos para hacer las interpretaciones y partiendo de este punto hacer los arreglos necesarios para que éstas quedaran bien, todo ese proceso llevaba hasta días, pues la ejecución que los músicos hacían en primera instancia no siempre era la adecuada, pues también se necesitaba de un tiempo destinado a ensayos para que las obras quedarán lo mejor montadas posible; sin embargo, con el avance de la tecnología este hecho quedó en el pasado, ya que los compositores y, por qué no, ejecutantes también, podían escuchar las composiciones realizadas, hacer los arreglos dependiendo de una herramienta que solo graba la primera vez y la reproduce cuantas veces sea necesario.

Apple e IBM también desarrollaban rápidamente. Los desarrollos de software subieron con el software de secuenciadores para esas computadoras. Los secuenciadores del software ofrecieron capacidades mucho mayores que sus contrapartes del hardware. Varios años después, las tarjetas de sonido se convirtieron en un estándar en las computadoras personales.

Actualmente la demanda de software es mayor en comparación con la de hardware, debido a que es mucho más cómodo contar con un estándar en la computadora de muy buena calidad, que tener conectadas las interfaces, ya sea de una computadora a un sintetizador o algún otro auxiliar, para poder ejecutar el sonido. Sin embargo, el uso de las conexiones de interfaces en MIDI son importantes y muy útiles, pues se puede hacer con ello infinidad de procedimientos, pruebas y trabajos.

2.3.1 ¿Qué es MIDI?

La idea base en el desarrollo de esta interfase era que un instrumento, al ser ejecutado, pudiera enviar la información a un segundo instrumento en tiempo real, de manera que éste pudiera ejecutar al unísono la melodía del primero, pero con un sonido diferente.

MIDI es un sistema de hardware, el cual utiliza básicamente tres conexiones, dos básicas y una tercera opcional. Las dos primeras son para transmitir (OUT) y recibir (IN) información hacia y desde otro instrumento, mientras que la restante (THRU), se usa solo en caso de necesitar encadenarse a otros dispositivos MIDI. Estos son puertos encontrados en los instrumentos electrónicos como el teclado, pero también se encuentra a este sistema con especificaciones del software para permitir que los instrumentos musicales electrónicos (y también las computadoras) se comuniquen uno a otro.

La especificación de MIDI original fue desarrollada hace más de 10 años, como un medio para que la gente pudiera “jugar” en instrumentos electrónicos de teclado, tocando de esta forma dos o más instrumentos de teclado en apenas uno solo [8].

Las tarjetas de sonido emplean esencialmente dos métodos para la generación de sonidos. La fuente principal son grabaciones del tipo PCM (como los archivos *.WAV para PC). Éstas son realmente grabaciones digitales, como las que el lector de discos compactos ejecuta al leer un disco compacto en un sistema estéreo. Estos archivos usan cerca de 10 Megabytes/minuto para producir sonido estéreo. Estos archivos en una grabación muy corta pueden ocupar mucho espacio en disco duro.

El segundo método que una tarjeta de sonido utiliza para producir sonido es mediante un sintetizador incorporado. La música es ejecutada cuando un archivo MIDI acciona los sonidos en el sintetizador. Estos archivos MIDI son pequeños y su espacio de

almacenaje lo es también, pues solo ocupa, en promedio 200 kilobytes, en contraste de los 30 megabytes que un disco compacto necesita para una canción de tres minutos.

Lo anterior se debe a que MIDI es un archivo musical y no un archivo de sonido. Estos archivos proceden de una partitura digital simulada, que pueden ser correctamente ejecutados en cualquier instrumento musical electrónico que soporta el MIDI General estándar. Un ejemplo simple es, que a diferencia de un archivo *.WAV que le dice a la tarjeta de sonido que tocar en la salida de audio (bocinas), MIDI le dice a la tarjeta de sonido cómo ese archivo va a sonar en la salida de audio. MIDI se basa en una tarjeta de sonido con un chip especial, el cual genera o crea un sonido desde una frecuencia. Debido a este proceso, los archivos MIDI son relativamente pequeños.

A continuación se muestra una tabla comparativa de archivos *.MID y archivos de audio digitalizado como los archivos *.WAV

	MIDI	Audio Digitalizado
Formato del archivo	.mid o .mff	.wav (PC), .aiff (Mac), .mp3 (formato comprimido), .voc, .au...
Ejemplo	ArchivoX.mid [10 KB] - 34 segundos	ArchivoX.mp3 [543 KB] - 34 segundos
Relación tamaño/tiempo	El tamaño de un archivo MIDI no es proporcional al tiempo que dura, sino al número de eventos que tiene. Por ejemplo, un archivo MIDI de 100 bytes podría durar más de 10 horas. Por otro lado, una canción con muchísimos eventos (muchas notas, cambios de instrumentos,	El tamaño del archivo es proporcional a su duración y a la calidad del mismo, a mayor calidad, más espacio. 1 segundo con calidad de CD estéreo (2 canales), sin comprimir ocupa: 176 KB/s. 1 segundo con calidad de teléfono ocupará: 16 KB/s.

	cambios de volumen, efectos) puede ocupar 10KB y durar menos de un minuto.	
Calidad de reproducción	Depende del banco de instrumentos utilizado, es decir, de la fuente de sonido.	Depende de la calidad de grabación, es decir, frecuencia de muestreo y número de bits por muestra.
Edición de los datos	Sencilla y rápida.	Más lenta y costosa. A cambio, permite numerosos efectos, ecualización, etc.
Conversión entre formatos	La conversión de un archivo MIDI a audio es relativamente sencilla, ya que tan sólo hay que capturar la señal generada por la fuente de sonido y almacenarla en un archivo wav.	Convertir un archivo de audio a MIDI es mucho más complejo. Debe realizarse un análisis de la señal con algoritmos muy complejos y con muchas limitaciones.

Tabla 2.1 Comparación de archivos .MID y .WAV

2.3.2 Generalidades de MIDI

MIDI fue la respuesta industrial a un mercado que demandaba compatibilidad de los instrumentos electrónicos. Los instrumentos equipados con MIDI emplean micro - procesadores para convertir acciones de ejecución (qué tecla se acciona, con qué velocidad, qué pedales están accionados, qué programa se usa, etc.) en un flujo de datos codificados digitalmente. Los datos digitales se pasan de un instrumento a otro a través de una interfaz serial, requiriendo un sólo cable para cada conexión. Por medio de este método una multiplicidad de instrumentos puede compartir datos musicales.

Actualmente pueden encontrarse puertos de comunicación MIDI no sólo en sintetizadores, sino también en consolas, controles de luz, procesadores de efectos y computadoras personales.

2.3.2.1 Estructura de datos MIDI

Un comando o mensaje especifica una acción a ejecutarse, por ejemplo, la acción de un Do central que es mandado de una computadora a un teclado, éste último lo recibe y ejecuta el comando, si está dentro de sus posibilidades; en caso contrario, lo ignora. Cada mensaje MIDI está codificado en una cadena de datos digitales.

Los datos MIDI se organizan en bytes de 8 bits, precedidos de un *start bit* (0) y seguidas de un *stop bit* (1). Estos últimos permiten al microprocesador del instrumento receptor distinguir el final de un byte del comienzo del siguiente.

Los bytes de datos MIDI se combinan en mensajes, que consisten en un byte de estado (*status byte*) seguido de uno o varios bytes de datos (*data bytes*). Los bytes de estado definen el tipo de comando que se transmite, como puede ser un *note on*, *pitch bend*, *patch change*, etc., los cuales serán explicados más adelante, y su primer bit es siempre 1. Los bytes de datos indican información específica respecto del comando del byte de estado como lo es el volumen de la nota, valor de inflexión de tono (*pitch bend*), número de patch, etc. y su primer bit es siempre 0.

El estándar general de MIDI prevé una extensa lista de 128 instrumentos de todo tipo, incluidos los electrónicos, que no existen en una sala de conciertos. La existencia de esta lista permite intercambiar archivos.MID entre diferentes sintetizadores sin problemas a la hora de asignar los timbres elegidos por el autor.

Por otra parte MIDI permite tener 10 Octavas y 8 semitonos para un teclado, lo cual excede en más de 3 octavas a cualquier piano. MIDI nos da un rango de valor de notas de 0 a 127. Se anexa, al final de este documento, una forma en la cual se dan a conocer todos los valores utilizados para mandar los mensajes a la interfaz MIDI y poder interactuar con ella [Anexo A.1].

Los mensajes MIDI se clasifican en dos grupos: mensajes de canal y mensajes de sistema.

En el actual proyecto se usan mensajes por canal de voz, pero se mencionan los diferentes tipos existentes debido a que se quiere dar a conocer que no es la única forma de mandar información a MIDI, el paso de información se puede complicar tanto como se quiera y de otra forma también puede ser usada de la forma en la que más convenga, dependiendo del caso de uso.

2.3.2.1.1 Mensajes de Canal

Los datos MIDI se pueden asociar a 16 canales. Un instrumento puede recibir datos en un canal o canales específicos e ignorar datos en otros canales. El canal MIDI por el que un instrumento recibe las instrucciones principales se denomina su canal principal.

Como el nombre lo indica, los mensajes de canal contienen información que se destina para un canal de recepción específico. Hay dos tipos de mensajes:

- Mensajes de canal de voz (*Voice channel message*): estos constituyen la mayor parte de la información MIDI. Controlan el circuito interno de generación de sonido, definiendo cuándo y cómo ha de tocarse una nota. Pueden usarse para otros propósitos también: los mensajes de *Note On* pueden disparar sonidos de percusión en máquinas de ritmo, controlar luces en un escenario o faders en una consola de mezcla.
- Mensajes de canal de modo (*Mode channel message*): definen la respuesta de los instrumentos a los mensajes anteriores y deben ser enviados a través del canal principal del instrumento que los recibirá. Existen cuatro modos: 1) *Omni on / Poly*

(responde a todos los canales y ejecuta polifónicamente); 2) *Omni on / Mono* (responde a todos los canales y ejecuta monódicamente); 3) *Omni off / Poly* (responde sólo a su canal asignado y ejecuta polifónicamente) y 4) *Omni off / Mono* (responde sólo a su canal asignado y ejecuta monódicamente).

2.3.2.1.2 Mensajes de Sistema

En vez de ser codificados por canal, los mensajes de sistema se dirigen o bien a todos los instrumentos de un sistema, o bien a algún sintetizador de una marca específica.

Estos mensajes son de tres tipos:

- Sistema Común (*System Common*): se dirigen a todos los instrumentos de un sistema, sin importar el canal MIDI. Generalmente usados con secuenciadores y máquinas de ritmo, estos mensajes llevan información tal como: la canción a ejecutar, en qué punto debe comenzar, etc.
- Sistema de tiempo Real (*System Real Time*): llevan referencia temporal a equipos MIDI, por ejemplo a una máquina de ritmo, que utiliza un reloj de sincronización. Para este tipo de sistema se cuenta con un pulso de reloj de mensaje, el cual provee un pulso de reloj a una frecuencia de 24 pulsos por negra; otros mensajes son comandos *Start*, *Stop* y *Continue* para playback de secuenciadores.
- Sistema exclusivo (*System Exclusive*): tiene formatos especiales para cada marca y modelo de equipo MIDI es utilizado para transmitir datos como valores de parámetros en un patch, memoria de sampleo o datos de archivo de un secuenciador; sólo aplicables a un instrumento en particular. Estos mensajes usan en

su byte de estado un número que identifica al fabricante. Cada compañía programa a sus instrumentos para reconocer sólo sus números de identificación.

2.4 Sistemas de Tiempo Real

En esta sección se hablará de qué son los sistemas de tiempo real y sus características, lo anterior con la finalidad de dar énfasis a este tipo de sistema, ya que el proyecto a desarrollar se basa en la ejecución de obras musicales en tiempo real. Uno de los factores determinantes en el diseño de este tipo de sistemas es el de asegurar un comportamiento predecible, cualesquiera que sean las condiciones de aplicación de los mismos.

El aspecto fundamental que diferencia a los sistemas de tiempo real del resto de los sistemas convencionales, es el hecho de que además de ser necesaria la satisfacción de todos los requerimientos computacionales normales, la corrección del sistema depende también del tiempo en que son producidos esos resultados. En otras palabras, un resultado lógicamente correcto pierde todo significado si el tiempo de espera por el mismo sobrepasa ciertos límites preestablecidos.

2.4.1 Definición

Existen muchas definiciones para los sistemas de tiempo real, entre ellas una definición que se encontró, la cual expresa de la mejor manera este concepto, es la definición que da Donald Gillies [13]. En su definición expresa que un sistema de tiempo real es aquel en el que para que las operaciones computacionales estén correctas no depende solo de que la lógica e implementación del programa sea correcto, sino también en

el tiempo en el que dicha operación entrega su resultado. Si las restricciones de tiempo no son respetadas el sistema se dice que ha fallado, es decir que el sistema es erróneo.

A partir de la definición anterior se puede afirmar que es esencial que las restricciones de tiempo en los sistemas sean cumplidas; para garantizar el comportamiento, en el tiempo requerido, se necesita que el sistema sea predecible. Es también deseable que el sistema obtenga un alto grado de utilización a la vez que cumple con los requerimientos de tiempo.

Un ejemplo de este tipo de sistema es el de un robot que necesita tomar una pieza de una banda sinfin. Si el Robot llega tarde, la pieza ya no estará donde debía recogerla. Por lo tanto el trabajo se llevó acabo incorrectamente, aunque el robot haya llegado al lugar adecuado. Si el robot llega antes de que la pieza llegue, la pieza aún no estará ahí y el robot puede bloquear su paso, lo cual provocará que el objetivo no sea cumplido y en consecuencia el sistema sea erróneo.

En algunas ocasiones se encuentran referencias sobre sistemas de tiempo real cuando solo se quiere decir que el sistema es rápido. Cabe mencionar que tiempo real no es sinónimo de rapidez; esto significa que no es la latencia de la respuesta el principal objetivo en un sistema de tiempo real (esta latencia a veces está en el orden de los segundos), el enfoque en tiempo real de la latencia es el asegurarse de que la latencia del sistema es la suficiente para resolver el problema al cual el sistema está dedicado.

Si el tener una falla en el tiempo de latencia de un proceso del sistema lleva como consecuencia un error en éste, entonces esos procesos se consideran de tiempo real estricto (*hard real time*). Si el tener una falla en un proceso del sistema no conlleva a una falla en el mismo, siempre y cuando esta falla este dentro de ciertos límites establecidos (es posible fallar en la latencia una de cada 1000 veces o una de cada 100, o fallar siempre y cuando el

error no exceda el 3% de la latencia), entonces esos procesos se llaman procesos de tiempo real permisible (*soft real time*). Si el funcionamiento incorrecto del sistema lleva a la pérdida de vidas o catástrofes similares entonces el sistema de tiempo real es nombrado como sistema de tiempo real de misión crítica, ya que no puede tener de ningún modo un retraso o una pérdida de latencia en la ejecución del sistema [31].

En el actual proyecto el sistema de tiempo real es estricto, ya que al ejecutar una obra musical no puede haber ningún tipo de retraso, el tiempo de ejecución es, en equivalencia para la ejecución musical, precisa, sin esto la obra no tendría ritmo, pieza esencial dentro de la ejecución de una obra.

2.4.2 Características del Sistema

2.4.2.1 Determinismo

El determinismo es una cualidad clave en los sistemas de tiempo real. Es la capacidad de determinar con una alta probabilidad, cuánto es el tiempo que se toma una tarea en iniciarse. Esto es importante por que los sistemas de tiempo real necesitan que ciertas tareas se ejecuten antes de que otras puedan iniciar.

Esta característica se refiere al tiempo que tarda el sistema antes de responder a una interrupción. Este dato es importante ya que casi todas las peticiones de interrupción se generan por eventos externos al sistema, por ejemplo una petición de servicio, así que es importante determinar el tiempo que tardará el sistema en aceptar la petición de servicio [34].

2.4.2.2 Responsividad

La Responsividad se enfoca en el tiempo que se tarda una tarea en ejecutarse una vez que la interrupción ha sido atendida. Los aspectos a los que se enfoca son:

- La cantidad de tiempo que se lleva el iniciar la ejecución de una interrupción.
- La cantidad de tiempo que se necesita para realizar las tareas que pidió la interrupción.
- Los efectos de interrupciones anidadas.

Una vez que el resultado del cálculo de determinismo y responsividad es obtenido. Se convierte en una característica del sistema y un requerimiento para las aplicaciones que correrán en él. Por ejemplo, si se diseña una aplicación en un sistema en el cual el 95% de las tareas deben terminar en cierto periodo de tiempo entonces es recomendable asegurarse que las tareas ejecutadas en esa aplicación no caigan en el 5% de bajo desempeño [34].

2.4.2.3 Usuarios Controladores

En estos sistemas, el usuario, por dar un ejemplo, los procesos que corren en el sistema, tienen un control mucho más amplio de éste.

- El proceso es capaz de especificar su prioridad.
- El proceso es capaz de especificar el manejo de memoria que requiere (qué parte estará en caché, qué parte en memoria swap y qué algoritmos de memoria swap usar).
- El proceso especifica qué derechos tiene sobre el sistema.

Aunque lo anterior parece anárquico, es decir que los procesos tomen decisiones por sí y se controlen a sí mismos, no lo es, debido a que los sistemas de tiempo real usan tipos de

procesos que ya incluyen estas características, y usualmente estos tipos de procesos son mencionados como requerimientos. Un ejemplo de usuarios controladores es el siguiente: cuando se especifica que los procesos de mantenimiento no deberán exceder el 3% de la capacidad del procesador, a menos de que en el momento que sean ejecutados el sistema se encuentre en la ventana de tiempo de menor uso [34].

2.4.2.4 Confiabilidad

La confiabilidad en un sistema de tiempo real es otra característica clave. El sistema no debe de ser solamente libre de fallas, más aún, la calidad del servicio que presta no debe de degradarse más allá de un límite determinado.

El sistema debe de seguir en funcionamiento a pesar de catástrofes, o fallas mecánicas. Usualmente una degradación en el servicio en un sistema de tiempo real lleva consecuencias catastróficas [34].

2.4.2.5 Operación a prueba de fallas duras (fail soft operation)

El sistema debe de fallar de manera que, cuando ocurra una falla, el sistema preserve la mayor parte de los datos y capacidades del sistema en la máxima medida posible. Que el sistema sea estable, quiere decir que si para el sistema es imposible cumplir con todas las tareas sin exceder sus restricciones de tiempo, entonces el sistema cumplirá con las tareas más críticas y de más alta prioridad [34].

2.4.3 Requerimientos

Debido que los sistemas de tiempo real tienen características especiales diferentes a los demás tipos de sistemas es importante saber qué tipo de requerimientos deben de tomarse en cuenta en el proceso de desarrollo.

Desde el punto de vista de Bina Ramamurthy [34], señala que si bien es cierto que los requerimientos referentes al tiempo real se aplican a todo el sistema, a menudo se tiene que agregar o modificar software, interfaces o hardware para que estos requerimientos se cumplan. Más aún, el software debe de estar preparado para que en la eventualidad de que un trabajo no cumpla con sus requerimientos de tiempo, cancele los demás trabajos relacionados con él. Por ejemplo, si una petición de entrada/salida toma más del tiempo establecido y se cancela por el sistema, el software de entrada/salida debe de informar al usuario del proceso que este evento ocurrió. Esto es claramente parte de la funcionalidad y de comportamiento del sistema.

Por lo anterior se deben tener claramente establecidos los requerimientos del sistema, ya que éstos pueden tener cambios significativos dentro del desarrollo de este mismo, por lo tanto, que en ocasiones se puede llegar a confundir las características de sistema con los requerimientos de este mismo. Una característica es algo que ya está en el sistema y que no puede ser calificada como errónea o correcta, y una restricción deberá de ser cumplida siempre y la forma en que estas restricciones se cumplen puede ser validada como errónea o correcta

Un sistema de tiempo real se puede volver muy complejo, en realidad para este proyecto lo interesante es la principal característica con la que este tipo de sistema tiene que cumplir. La ejecución del programa debe ser de tal forma que no debe perder tiempo entre la ejecución de una instrucción y otra, algunas veces cuando son sistemas con un rango de

error esto puede pasar, pero para el actual proyecto es imposible, ya que si la ejecución de la obra musical o secuencia de notas fuera retrazada o adelanta el sistema se calificaría de erróneo, aunque las notas y la secuencia de éstas fuera la correcta, puesto que el ritmo no sería respetado y en tal caso, el sistema fallaría; en ausencia de lo anterior el sistema se ejecutaría de la manera en que debe y sería un sistema sin problemas.