



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ARAGÓN

“EL USO DE LA TECNOLOGÍA COMPUTACIONAL PARA LA CREACIÓN DE MUSICA”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO EN COMPUTACIÓN

P R E S E N T A :

JUAN MANUEL ALVARADO LÓPEZ

ASESOR: LIC. LOBATO HERRERA ESTEBAN

SAN JUAN DE ARAGÓN, EDO. DE MÉXICO

2005

m. 346805



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Autorizo a la Dirección General de Mantenimiento de la UNAM a utilizar en cualquier momento e impresos contenidos de este libro las fotografías.

NOMBRE: Juan Manuel

Alvarado Lopez

FECHA: 9 de Junio de 1985

FIRMA: [Signature]

A mis padres a quienes nunca
podré pagar todos los sacrificios y
los esfuerzos para hacer de mí una
persona de provecho a la sociedad

A mis hermanos porque con su
ayuda y apoyo he logrado
conseguir este objetivo.

Temario

JUSTIFICACIÓN DEL TEMA.....	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y DELIMITACIÓN.....	3
ALCANCES Y LÍMITES.....	5
OBJETIVOS.....	6
METODOLOGÍA.....	8
CAPÍTULO 1 : EL SONIDO; MARCO TEÓRICO.....	9
1.1 INTRODUCCIÓN.....	10
1.2 ¿QUÉ ES EL SONIDO?.....	11
1.3 ¿CÓMO SE PROPAGA EL SONIDO?.....	12
1.4 CARACTERÍSTICAS DEL SONIDO.....	12
1.4.1 Frecuencia.....	12
1.4.2 Longitud de onda.....	13
1.4.3 Amplitud o intensidad.....	13
1.5 ¿QUÉ ES UN DECIBELIO O DECIBEL DB?.....	14
1.6 ¿QUÉ ES LA PRESIÓN ACÚSTICA Y EL NIVEL DE PRESIÓN SONORA O ACÚSTICA?.....	16
1.7 ¿QUÉ ES LA INTENSIDAD SONORA O ACÚSTICA Y EL NIVEL DE INTENSIDAD SONORA/ACÚSTICA?.....	16
1.8 ¿QUÉ ES LA POTENCIA SONORA/ACÚSTICA Y EL NIVEL DE POTENCIA SONORA/ACÚSTICA?.....	17
1.9 ¿CÓMO SE MIDE EL NIVEL SONORO?.....	17
1.9.1 ¿Qué es el dBA o la ponderación -A-?.....	18
1.9.2 ¿Cómo se suman los niveles de sonido?.....	18
1.10 ¿A PARTIR DE QUE NIVELES EL SONIDO ES PERJUDICIAL?.....	19
1.11 EN EL ESTUDIO DE GRABACIÓN.....	19
1.11.1 ¿Qué es el Coeficiente de Absorción de un material?.....	20
1.11.2 ¿Qué es Eco, Reverberación y Resonancia?.....	20
1.12 ¿QUÉ ES LA ALTURA (TONO) DE UN SONIDO?.....	22
1.13 ¿QUÉ ES EL TIMBRE?.....	23
1.14 ECUALIZADORES.....	24
1.14.1 ¿Qué es una octava, media octava y tercio de octava?.....	24
1.14.2 ¿Qué es un filtro de ancho de banda constante?.....	25
1.14.3 ¿Qué es un filtro de ancho de banda proporcional?.....	26
1.15 ¿QUÉ ES EL RUIDO ROSA?.....	27
1.16 ¿QUÉ ES EL RUIDO BLANCO?.....	27
1.17 ¿QUÉ ES LA DISMINUCIÓN ESPACIAL DEL NIVEL SONORO?.....	28
1.18 MICRÓFONOS, TIPOS Y UTILIZACIÓN PRÁCTICA.....	29
1.18.1 El diagrama polar.....	29
1.18.2 La sensibilidad.....	34
1.18.3 Ruido propio.....	35
1.18.4 Relación Señal Ruido (S/R).....	35
1.18.5 Respuestas de frecuencias.....	36
1.18.6 La impedancia.....	36
1.19 CLASIFICACIÓN DE LOS MICRÓFONOS SEGUN SU TRANSDUCTOR.....	37
1.19.1 Bobina móvil.....	37
1.19.2 De cima.....	38
1.19.3 Electroestáticos o de capacitor.....	38
1.20 TARJETAS DE AUDIO.....	39
1.20.1 Tarjeta de Sonido Sound Blaster Audigy2.....	40
1.21 CONCLUSIÓN.....	42
CAPÍTULO 2 : LA COMPUTADORA Y EL SONIDO.....	43
2.1 INTRODUCCIÓN.....	44
2.2 AUDIO DIGITAL INTRODUCCIÓN.....	45
2.2.1 Almacenamiento.....	45
2.2.1.1 Muestreo.....	45

2.2.1.2 Cuantificación.....	47
2.2.1.3 Codificación.....	50
2.2.2 Reproducción.....	52
2.2.3 Ventajas.....	53
2.3 MIDI INTRODUCCIÓN.....	54
2.3.1 Mensajes de canal.....	58
2.3.1.1 Mensajes de voz.....	58
2.3.1.2 Mensajes de modo.....	62
2.3.2 Mensajes de sistema.....	66
2.3.2.1 Mensajes de sistema común o comunes de sistema.....	66
2.3.2.2 Mensajes de sistema de tiempo real.....	68
2.3.2.3 Mensajes de sistema exclusivo (System exclusive messages).....	70
2.3.3 Utilización.....	71
2.4 CONCLUSIÓN.....	76
CAPÍTULO 3 COMPOSICIÓN MEDIANTE LA COMPUTADORA, MÚSICA AUTOMÁTICA	77
3.1 INTRODUCCIÓN.....	78
3.2 MÉTODOS ALEATORIOS.....	79
3.2.1 Métodos aleatorios: Sucesos independientes.....	80
3.2.2 Sucesos dependientes: Música con memoria.....	84
3.3 MÉTODOS DETERMINISTAS.....	86
3.3.1 Manipulaciones musicales.....	86
3.3.2 Otros métodos.....	87
3.4 VARIOS MÉTODOS PROCEDENTES DE LAS MATEMÁTICAS, LA FÍSICA Y OTROS CAMPOS EXTRAMUSICALES.....	88
3.4.1 Fractales.....	89
3.4.1.1 Ruido 1/f y música.....	90
3.4.1.2 Demostración con fragmentos musicales.....	92
3.4.1.3 De la geometría fractal a la música.....	95
3.4.2 El caos y los sistemas dinámicos no lineales.....	97
3.4.3 Inteligencia artificial.....	99
3.5 CARACTERÍSTICAS.....	100
3.6 MIDIMATH.....	101
3.7 IANNIS XENAKIS.....	104
3.7.1 Biografía.....	104
3.7.2 Obra.....	105
3.7.3 Lista de Obras.....	106
3.8 LINDA LONG.....	108
3.8.1 La música de las plantas.....	109
3.8.2 ¿Cómo se hace "música molecular".....	109
3.9 CONCLUSIÓN.....	112
CONCLUSIÓN FINAL Y PROPUESTAS.....	113
BIBLIOGRAFÍA.....	114

Justificación del tema

La tecnología computacional, entiéndase por tecnología computacional el hardware y software y su constante evolución, ha tenido un enorme avance. La cantidad de cosas que en nuestros días se pueden hacer con las computadoras han sobrepasado por mucho las ideas que los iniciadores de esta actividad de desarrollo de las máquinas tuvieron cuando empezaban.

Las aplicaciones académicas no podían quedar fuera del alcance de las computadoras y los especialistas de esta rama del conocimiento no podían faltar, ellos desarrollan muchas aplicaciones para las computadoras y una de ellas es la producción de música. En esta tesis se aborda el tema que involucra el uso de la computadora y de su software para la producción de música. Muchos estudiantes, de música sobre todo, y fanáticos de la música también están interesados en aprender este tipo de aplicaciones. Y no es el único campo del conocimiento en donde se pueden aplicar estos conocimientos, porque el sonido es un elemento que da mucho más grandilocuencia a muchas disciplinas como el cine, la televisión, la radio, teatro, conciertos, etc.

El modo en el que se mejoran las aplicaciones para computadora y las computadoras en sí, es con el uso de las tecnologías generadas para probar los rendimientos y los límites de éstas, y con la aportación de opiniones de los especialistas de esta tecnología los sistemas se pueden mejorar. Es un proceso que requiere de ensayos y errores, es decir experimentación, que da como resultado planteamientos de nuevos problemas y nuevos retos para los desarrolladores de los equipos y de software de este tipo.

Para la ingeniería en computación la creación de ésta y otras tecnologías es una labor primordial, pero el uso de ellas también es primordial y el uso para su mejoramiento y para propiciar la utilización de estas herramientas por más gente para facilitar su trabajo es una constante también. Para el caso de esta tesis, se expone, la utilización de la computadora para la producción de música como proyecto, que muchas veces es necesario para lograr metas; como el reconocimiento por el trabajo creativo del autor, para la remuneración por un trabajo para alguien más, destacar en el mundo de la música, emprender una carrera de producción de música, compositor, etc.

Esta tesis pretende hacer ver a los lectores que el trabajo de ingeniería en computación y el equipo desarrollado para el tratamiento del audio son cosas que, han costado trabajo conseguir, pero, el objetivo siempre es crear

herramientas más fáciles de utilizar y mejores cada vez. Es una tesis que trata de llegar a las manos de los interesados en el tema, para que se involucren más cada vez y empiecen a trabajar con sus computadoras y su talento para resolver sus problemas o los problemas de alguien más usando para ello lo que se diseña día con día, y que puedan mostrar su trabajo y vivir haciendo lo que les gusta hacer y lo mejoren cada día con el uso y actualización de sus recursos.

Hay muchas instituciones que han abordado carreras como la de ingeniería en audio y para el campo de la docencia se necesitan personas que sepan como operan los programas y los diferentes equipos, y que lo enseñen a los alumnos de estas disciplinas, estos educadores pueden ser gente con la experiencia en el ramo de la computación y que además estén comprometidos en el desarrollo de nuevas tecnologías para éste fin. Los ingenieros en computación son excelentes candidatos a estos puestos ya que la formación que han obtenido otorga una gran ventaja para desempeñar las actividades de docencia y propiciar el uso de la tecnología.

Desde mi particular punto de vista esta tesis se justifica en ser realizada porque la generación de empleos a partir del conocimiento de estas tecnologías, la autorrealización de objetivos, el comienzo de una actividad profesional de este tipo, etc. son resultados del conocimiento de los últimos desarrollos, de sus aplicaciones y por supuesto del uso que se de a estas herramientas, uso que se dará en mayor grado, mientras mejor información se tenga al respecto. En mi experiencia personal la información acerca de las técnicas computacionales para la creación, grabación y producción de música es incompleta y escasa. Pretendo desarrollar el contenido de esta tesis para que sea un libro informativo para los interesados en el tema de la producción de música, y generar mayor interés en tecnologías afines que no se mencionan aquí. La producción de música no es una tarea fácil de hacer, y con buenas herramientas a la mano puede facilitarse, e incluso se puede experimentar con la música y el sonido. Y precisamente para aquellos que tienen inquietud de mostrar su talento o darle un poco de ayuda al mismo, culminando con creaciones musicales propias es que justifico el trabajo de esta tesis, para que el camino del conocimiento de estos métodos y con carácter científico les resulte más fácil.

Planteamiento del problema y delimitación

La producción de música con ayuda de la computadora es una actividad que ha tenido poca difusión, no obstante la facilidad que implica el uso de esta herramienta. Los textos destinados al conocimiento de esta tecnología son pocos, comparados por ejemplo con los destinados para la programación, las bases de datos, Internet... Esta tesis aborda en este problema y no es una pretensión de la misma el resolverlo, no sería posible solo con una tesis, pero la difusión de los conocimientos propios y los adquiridos de muchas fuentes más es importante para que el conocimiento del tratamiento de la música en la computadora se extienda y se use.

El tema de esta tesis involucra el uso de tecnologías para producción de música en las computadoras. Es un tema que concierne a muchas disciplinas, entre ellas la música que es una disciplina importante para esta tesis, pero la tesis no atiende a explorar *teoría musical*, sino a *trabajar con el conjunto de los conocimientos musicales en la computadora*, otra disciplina es la ingeniería en computación, ya que una de sus ocupaciones es el desarrollo de las aplicaciones de software y el hardware que en ella trabajan y su interacción con otros dispositivos, y la capacitación para el uso de éste software y los dispositivos.

El cometido de esta tesis es el de generar el interés en muchos lectores. Esto se pretende lograr ya que en la tesis se muestran diferentes tipos de software y hardware que hay para trabajar en esta actividad, su utilización así como consejos de utilidad para el mejor aprovechamiento de estas herramientas, teoría y explicación de la forma en que la computadora trabaja con los datos que introducen los usuarios, para la mejor comprensión de los mecanismos y tratamiento que se puede dar a la información musical ingresada a la computadora, además de la definición de varios conceptos de la terminología usada por los especialistas del ramo y conceptos y explicación de técnicas para hacer una creación musical, todo con el fin de hacer comprensible y aplicable esta recopilación de teoría.

Esta tesis es un trabajo que reúne la experiencia personal y se extiende con el resultado de la investigación. Es un esfuerzo por reunir el conocimiento teórico para una aplicación más específica. Es una tesis que contiene información valiosa tanto para el que sabe algo, como para el que no sabe mucho pero desean aprender el tema, con esto no quiere decir que sea una tesis demasiado básica pero trata de abordar los temas con cierta sencillez para que sean más fáciles de entender y aplicar.

La tesis presenta un trabajo descriptivo, que lleva paso a paso al lector por el conocimiento de la tecnología musical. La inquietud por realizar este proyecto fue el desconocimiento de muchas de las tecnologías que existen, no obstante el conocimiento de otras más. Además, la experiencia en el estudio de la música y los intentos de promover las creaciones de un grupo de rock, fueron elementos importantes para perseguir este objetivo, y dada la falta de material especializado y la falta de centros de enseñanza de esta tecnología, o lo caro de sus servicios, se formuló una tesis didáctica para todo el interesado en el uso de la tecnología computacional para la creación de música.

Alcances y Límites

La obra no pretende el nuevo desarrollo de tecnología, ni lo sugiere explícitamente, es una revisión del material que existe para trabajar y ejemplos, teoría y sugerencias de uso de una tecnología que ha tenido poca difusión incluso entre la gente que esta allegada a la música, lo que es verdaderamente malo porque la facilidad de uso es cada vez mayor y el costo de una respetable producción propia no se compara con los costos de una producción en estudios. Es un manual para el aprendizaje autodidacta de la tecnología de computadoras para crear música. La descripción de los conceptos generales hacen más fácil la comprensión de este tema.

No es posible explorar el catálogo completo de programas que existen en el mercado para la producción de música y edición de audio y además no es importante señalar a todos dado que algunos ofrecen poca utilidad, o son limitados en sus funciones, y tampoco es posible hablar de la experiencia de trabajar con algunos equipos muy sofisticados para la inserción de audio en las computadoras porque son costosos y de difícil acceso, además de que no es el caso del tema que esta tesis aborda, pero se mencionan como medio para la recolección de datos para una composición musical.

La música y el conocimiento de la teoría musical para obtener una creación musical no se abordan en esta tesis, dado que el estudio de la música no es el tema central de ésta tesis, sino *la interacción de ésta con la computadora, y con el usuario de las computadoras*. Además de que sería un tema muy extenso que ocuparía un tema de tesis en sí pero que no concierne a la ingeniería en computación, profesión para la que se destina esta tesis.

Objetivos

Para mencionar el objetivo de la obra, ésta se desglosa en objetivos particulares o específicos, y los objetivos específicos darán en conjunto el objetivo general de la obra. Cada objetivo particular se concentra en un capítulo, así pues tenemos tres objetivos particulares en tres capítulos, que a continuación se mencionan.

En el capítulo uno se toca el tema del sonido como concepto y se definen otros términos que se refieren a la manera en que el sonido se mide, se procesa, etc. Esta parte de la tesis se enfoca en el conocimiento teórico de los procesos del sonido y de algunos instrumentos que sirven para captarlo, ya sea para medirlo o para procesarlo y para tomarlo por ejemplo, como entrada de datos para una grabación. Aquí también se exponen diferentes tipos de hardware y equipos relacionados con la recolección de datos.

En el capítulo dos se toma de nuevo el sonido pero ahora no como concepto sino como una fuente de datos o una fuente de información, hacia la computadora o procedente de ella. En esta parte del libro la computadora toma parte activa del proceso del sonido y la creación de música, ya sea con medios humanos; es decir con una persona como interprete que plasma su obra en grabación, partitura, etc. y usa para ello las herramientas computacionales que tiene a su alcance o que le son útiles, o con medios electrónicos, esto es, usando la computadora para producir el sonido de los instrumentos que le ordenamos, o para procesar el sonido de una entrada x, para después usarlo, reproduciéndolo o grabándolo, etc. aquí se exponen algunos ejemplo de programas para creación de música y su utilización.

En el capítulo tres se aborda el tema de la creación de música pero ahora desde un enfoque automático. La música generada en la computadora, puede ser una obra concebida por una persona, pero también puede ser una máquina quien produce la música, sin que alguien le diga exactamente que tocar. Es una parte importante de esta obra, además de que no se ha explorado ni difundido con profundidad. En el tema de este punto del libro hay muchas opiniones encontradas, por ejemplo, se dice que la música que es generada por una máquina carece de sentimiento, que es artificial, que no es buena, etc., pero puede servir para generar la semilla de una composición y puede aportar ideas. Como se verá sobre este tema no hay nada fijo, las reglas en las que la computadora se basa para hacer música dependen del compositor o usuario de la computadora.

En general el objetivo de la tesis es promover el uso de la tecnología computacional en el ámbito musical. Para que los involucrados en la generación, la producción, composición, escritura, grabación, etc. de música tengan por medio del conocimiento de ellas, las herramientas que faciliten y mejoren su trabajo, y para quienes se integran recientemente a esta campo de actividad humana, que es la música: una de las bellas artes que tiene como fundamento el hacer bien combinar los sonidos con el tiempo, lo puedan hacer de una manera sencilla.

Metodología

La tesis expone un tema que involucra dos disciplinas, pero no hace referencia directa a la teoría musical. Es una tesis documental, descriptiva y explicativa de tecnologías de cómputo que existen para trabajar con la música. La tesis aborda el tema haciendo una revisión de material existente, referido a la interacción de la música y las computadoras y al sonido en sí. El tipo de investigación de la tesis es documental con nivel de organizar información de la interacción hombre – música – máquina.

Para la realización de este tema de tesis, se inició por supuesto por su elección, este proceso se vio favorecido por la inquietud del autor en el tema de la música y por la terminación de los estudios de ingeniería.

El primer paso para el inicio de la tesis fue delimitar el tema, dado que en primera instancia el tema era abrumador. Para poder delimitarlo se inició una lectura de material bibliográfico sobre el tema en general, hasta que se consiguió como resultado de la investigación su delimitación y la formación de la idea general del proyecto.

Una vez que el proyecto se tenía diseñado inició una vez más una revisión de material bibliográfico concerniente al tema específico; material que ya se había revisado, pero esta vez la revisión fue mucho más minuciosa, además de que se adicionó material más especializado. La información se organizó para poder acceder a los materiales adecuados en los temas que los requirieran. Para esta organización se utilizaron materiales de apoyo a la investigación, como fichas de trabajo y bibliográficas que sirvieron para mantener el mapa de trabajo trazado desde el principio.

También se utilizaron como fuente de información experiencias de la gente que trabaja con la música y que utiliza las herramientas computacionales, esta fuente de información fue no solo de adquisición sino también de comprobación de los conocimientos que tienen algunas personas y los que no tienen por la falta de materiales didácticos.

Como parte final vino la redacción del trabajo de tesis que conjuntaba el trabajo de investigación de forma escrita y que se apoyaba de los materiales antes mencionados como fichas y mapas de diseño del trabajo.

Capítulo 1 : El Sonido; Marco Teórico

1.1 Introducción

La música, una de las bellas artes que se fundamenta en la combinación del sonido con el tiempo, el tiempo es continuo así que lo que sucede es que creamos sonidos de distintas duraciones ordenados convenientemente para producir una sensación de ritmo y armonía. Como se ve la materia prima de la música es el sonido y el tiempo, pero como no se trata de hacer una revisión de la teoría musical en este trabajo de tesis, el tiempo no se tratará con detalle ya que las características temporales que se aplican a la música no conciernen al tema, y como ya se menciona el trabajo de investigación de esta tesis está dirigido a todo el interesado en el tema, y puesto que el tema es la música se supone que se sabe un poco acerca de ella. Pero el sonido, que es también materia prima, lo consideraremos en esta investigación, ya que sus características son importantes para todos aquellos interesados, que como se menciona deben saber algo de música aunque no sea de alto grado, ya que se verá la forma en que es tratado por los dispositivos y por la computadora y sus aplicaciones.

En éste capítulo se verá el sonido como fundamento de la música y como fenómeno físico, y se verán sus características para entender la forma en que es captado por distintos dispositivos para poder así saber como captarlo y medirlo mucho mejor. Al mismo tiempo nos servirá de preámbulo para los posteriores capítulos en los que el sonido también tendrá un papel protagónico pero en diferente faceta.

El sonido en este capítulo será un fenómeno físico y de ahí surgirá su explicación. Al finalizar este capítulo la información revisada servirá para entender mejor los siguientes capítulos.

1.2 ¿Qué es el Sonido?

“En el nivel físico lo que llamamos sonido es una onda que tras el estremecimiento de una o varias fuentes llamadas “cuerpos sonoros”, se propaga según unas leyes muy particulares y, de paso a, lo que llamamos oreja. Esta onda presume un medio propagador sin el cual, a decir verdad, no hay sonido en absoluto”¹

El sonido es una sensación auditiva creada por una vibración física.² Es la vibración de un medio elástico, bien sea gaseoso, líquido o sólido. Cuando nos referimos al sonido audible por el oído humano, estamos hablando de la sensación detectada por nuestro oído, que producen las rápidas variaciones de presión en el aire por encima y por debajo de un valor estático. Este valor estático nos lo da la presión atmosférica (alrededor de 100.000 pascals) el cual tiene unas variaciones pequeñas y de forma muy lenta, tal y como se puede comprobar en un barómetro.

Cuando las rápidas variaciones de presión se centran entre 20 y 20.000 veces por segundo (igual a una frecuencia de 20 Hz a 20 kHz) el sonido es potencialmente audible aunque las variaciones de presión puedan ser a veces tan pequeñas como la millonésima parte de un pascal. Los sonidos muy fuertes son causados por grandes variaciones de presión, por ejemplo una variación de 1 pascal se oiría como un sonido muy fuerte, siempre y cuando la mayoría de la energía de dicho sonido estuviera contenida en las frecuencias medias (1kHz - 4 kHz) que es donde el oído humano es más sensitivo.

El sonido lo puede producir diferentes fuentes, desde una persona hablando hasta un altavoz, que es una membrana móvil que comprime el aire generando ondas sonoras. Cuando los objetos vibran, las moléculas de las partículas de aire se ponen en movimiento y se transmiten formando ondas sonoras. El sonido puede catalogarse a grosso modo en sonidos simples (ej. una onda sinusoidal o tono puro) y en sonidos complejos (ej. el habla o el ruido). Los términos subjetivos que se empleamos para describir el sonido, tales como tono e intensidad, tienen su equivalente en el reino científico y físico: frecuencia e intensidad o amplitud.

¹ Michael Chion
El Sonido
Paidós Comunicación

² Glyn Alkin
Grabación y reproducción de sonido
Centro Universitario de Estudios Cinematográficos
UNAM

1.3 ¿Cómo se propaga el sonido?

El movimiento ondulatorio puede ser longitudinal (cuando la dirección del movimiento es la misma que la de propagación); torsional (movimiento de torsión) o transversal (como la vibración de una cuerda).

La onda sonora requiere un medio material de propagación, como el aire, el agua o la madera. A diferencia de la luz, el sonido no viaja en el vacío. Cuando un sonido atraviesa el aire, que es el medio que generalmente hace reaccionar nuestros oídos (aunque también es posible oír a través de un movimiento mecánico conducido por contacto), el movimiento ondulatorio es longitudinal. Las ondas se forman por las variaciones existentes en la presión del aire, oscilando alternativamente de arriba a abajo de la presión barométrica prevaleciente.

La velocidad de propagación del sonido en el aire es de unos 334 m/s. y a 0° es de 331,6 m/s. La velocidad de propagación es proporcional a la raíz cuadrada de la temperatura absoluta y es alrededor de 12 m/s mayor a 20°. La velocidad es siempre independiente de la presión atmosférica. En el agua la velocidad de propagación es de 1500 m/s.

1.4 Características del sonido

1.4.1 Frecuencia

“La frecuencia es el número de veces que se repite un ciclo cada segundo ciclo = cada repetición de una onda (sonora)”³

Como hemos visto el sonido se produce como consecuencia de las compresiones y expansiones de un medio elástico, o sea de las vibraciones que se generan en él.

La frecuencia de una onda sonora se define como el número de pulsaciones (ciclos) que tiene por unidad de tiempo (segundo). La unidad correspondiente a un ciclo por segundo es el hertzio (Hz).

Las frecuencias más bajas se corresponden con lo que habitualmente llamamos sonidos "graves", son sonidos de vibraciones lentas. Las frecuencias más altas se corresponden con lo que llamamos "agudos" y son vibraciones muy rápidas.

³ Juan Carlos Oros Cabello
Midi y Mod Fácil con el PC
RA-MA

El espectro de frecuencias audible varía según cada persona, edad etc. Sin embargo normalmente se acepta el intervalo entre 20 Hz y 20 kHz⁴.

La figura 1 muestra cómo el nivel de presión sonora de un sonido de baja frecuencia se forma comparado con un sonido de alta frecuencia de la misma amplitud (intensidad). Debe fijarse en que en el mismo periodo de tiempo, el sonido de baja frecuencia describe un solo ciclo mientras que el de alta frecuencia describe ocho ciclos. Por lo tanto, si el sonido de baja frecuencia representara 1 KHz., el de alta frecuencia representaría 8 KHz.

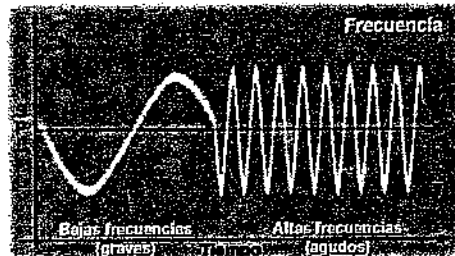


Figura 1

1.4.2 Longitud de onda

El sonido viaja a cierta velocidad y la forma de la onda pasa por un punto que se repite a cierta frecuencia. Estos puntos de repetición deben tener cierta distancia que los separe. A esta distancia se le conoce como longitud de onda (λ), la cual se relaciona con la frecuencia (f) y la velocidad (v) por la siguiente ecuación:

$$\lambda = v/f$$

1.4.3 Amplitud o intensidad

La intensidad de un sonido se refiere a la amplitud del sonido y se mide en dB SPL (decibeles de nivel de presión sonora) o en dB IL (decibeles de nivel de intensidad). Cuanto mayor sea la amplitud, mayor serán los dB SPL, y más fuerte será el sonido (por ejemplo, el zumbido de un avión comparado con el sonido de una respiración suave).

⁴ Des Lyver
Principios básicos de sonido para video
Editorial Gedisa 2000

“Amplitud es el valor máximo de la variación de presión de la onda sonora ya sea positivo o negativo”⁵

Un adulto sano es más sensible a los sonidos que se encuentran en un rango de frecuencias que va desde los 500 a los 8000 Hz, lo cual se corresponde con las frecuencias de los sonidos del habla. El sonido más suave (el umbral de audición) que un oído normal puede percibir, se encuentra alrededor de los 0 dB SPL. El sonido más fuerte que puede tolerar (umbral de dolor) se encuentra entre 120-140 dB SPL.

La figura 2 muestra la comparación entre un sonido suave y uno más fuerte de la misma frecuencia. Nótese que el sonido fuerte (de gran amplitud) alcanza puntos más altos de nivel de presión sonora que el sonido suave (de baja amplitud). Si se alcanzan extremos de SPL, la presión puede ser tan alta que llega a dañar el oído, al igual que si se tratara de un golpe físico.

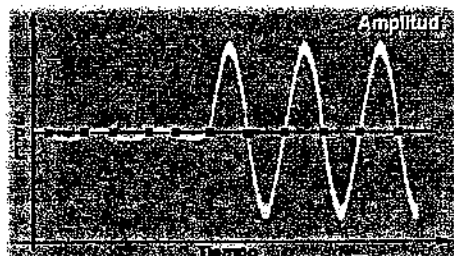


Figura 2

1.5 ¿Qué es un Decibelio o Decibel dB?

El decibelio es una unidad logarítmica de medida utilizada en diferentes disciplinas de la ciencia. En todos los casos se usa para comparar una cantidad con otra llamada de referencia. Normalmente el valor tomado como referencia es siempre el menor valor de la cantidad. En algunos casos puede ser un valor promediado aproximado. En Acústica la mayoría de las veces el decibelio se utiliza para comparar la presión sonora, en el aire, con una presión de referencia. Este nivel de referencia tomado en Acústica, es una aproximación al nivel de presión mínimo que hace que nuestro oído sea capaz de percibirlo. El nivel de referencia varía lógicamente según el

⁵ Juan Carlos Oros Cabello
Midi y Mod Fácil con el PC
RA-MA

tipo de medida que estemos realizando. No es el mismo nivel de referencia para la presión acústica, que para la intensidad acústica o para la potencia acústica.⁶ A continuación se dan los valores de referencia.

$$\text{Nivel de Referencia para la Presión Sonora (en el aire)} = 0.00002 = 2\text{E-5 Pa (rms)}$$

$$\text{Nivel de Referencia para la Intensidad Sonora (en el aire)} = 0.000000000001 = 1\text{E-12 w/m}^2$$

$$\text{Nivel de Referencia para la Potencia Sonora (en el aire)} = 0.000000000001 = 1\text{E-12 w}$$

Como su nombre indica el decibelio es la décima parte del Bel. El Bel es el logaritmo en base 10 de la relación de dos potencias o intensidades. No obstante esta unidad resulta demasiado grande por lo que se ha normalizado el uso de la décima parte del Bel, siendo el decibel o decibelio. La formula para su aplicación es la siguiente, partiendo que la intensidad acústica en el campo lejano es proporcional al cuadrado de la presión acústica, se define el nivel de presión sonora como:

$$L_p = 10 \log (p^2/p_r) = 20 \log p/p_r$$

Siendo L_p = Nivel de Presión sonora; p la presión medida; p_r la presión de referencia (2E-5 Pa)

Como es fácil ver el nivel de referencia siempre se corresponde con el nivel de 0 dB:

$$L_p = 20 \log (0.00002/0.00002) = 20 \log(1) = 20 * 0 = 0 \text{ dB}$$

Por la tanto en 0 dB tenemos el umbral de audición del oído humano, se supone que no es posible oír por debajo de este nivel, o sea variaciones de nivel en la presión del aire inferiores a 0,00002 pascal.

La razón por la que se utiliza el decibelio es que si no, tendríamos que estar manejando números o muy pequeños o excesivamente grandes, llenos de ceros, con lo que la posibilidad de error sería muy grande al hacer cálculos. Además también hay que tener en cuenta que el comportamiento del oído humano esta mas cerca de una función logarítmica que de una

⁶ Des Lyver
Principios básicos de sonido para video
Editorial Gedisa 2000

lineal, ya que no percibe la misma variación de nivel en las diferentes escaías de nivel, ni en las diferentes bandas de frecuencias⁷.

1.6 ¿Qué es la Presión Acústica y el Nivel de Presión Sonora o Acústica?

La presión sonora, es la presión que se genera en un punto determinado por una fuente sonora. El nivel de presión sonora SPL se mide en dB(A) SPL y determina el nivel de presión que realiza la onda sonora en relación a un nivel de referencia que es $2E-5$ Pascal en el aire.

Es el parámetro más fácil de medir, se puede medir con un sonómetro. Su valor depende del punto donde midamos, del local etc. Realmente no da mucha información sobre las características acústicas de la fuente, a no ser que se haga un análisis frecuencial de los niveles de presión, dado que el SPL siempre esta influenciado por la distancia a la fuente, el local etc.

1.7 ¿Qué es la Intensidad Sonora o Acústica y el Nivel de Intensidad Sonora/Acústica?

Se puede definir como la cantidad de energía sonora transmitida en una dirección determinada por unidad de área. Con buen oído se puede citar dentro de un rango de entre 0.000000000001 w por metro cuadrado, hasta 1 w.

Para realizar la medida de intensidades se utiliza actualmente analizadores de doble canal con posibilidad de espectro cruzado y una sonda que consiste en dos micrófonos separados a corta distancia. Permite determinar la cantidad de energía sonora que radia una fuente dentro de un ambiente ruidoso. No es posible medirlo con un sonómetro. El nivel de intensidad sonora se mide en w/m^2 .

⁷ Michael Chion
El sonido
Paidós communication 1999

“La intensidad sonora es difícil de medir, por lo que se mide generalmente la presión sonora en un número suficiente de puntos de la superficie esférica que envuelve a la fuente.”⁸

1.8 ¿Qué es la Potencia Sonora/Acústica y el Nivel de Potencia Sonora/Acústica?

La potencia acústica es la cantidad de energía radiada por una fuente determinada. El nivel de potencia Acústica es la cantidad de energía total radiada en un segundo y se mide en w. La referencia es $1\text{pw} = 1\text{E-}12\text{ w}$.

Para determinar la potencia acústica que radia una fuente se utiliza un sistema de medición alrededor de la fuente sonora a fin de poder determinar la energía total irradiada.

La potencia acústica es un valor intrínseco de la fuente y no depende del local donde se halle. Es como una bombilla, puede tener 100 w y siempre tendrá 100 w la pongamos en nuestra habitación o la pongamos dentro de una nave enorme su potencia siempre será la misma. Con la potencia acústica ocurre lo mismo el valor no varía por estar en un local reverberante o en uno seco. Al contrario de la Presión Acústica que si que varía según varíe las características del local donde se halle la fuente, la distancia etc.

1.9 ¿Cómo se mide el Nivel Sonoro?

Para medir el nivel sonoro disponemos de los Sonómetros. Estos aparatos nos permiten conocer el Nivel de Presión sonora o SPL (Sound Pressure Level). Normalmente suelen ser sistemas digitales y presentan en una pantalla de cristal líquido los valores medidos. Estos siempre se dan como decibeles dB y en referencia al valor antes señalado de (2E-5 Pa). Con el sonómetro es posible además del hallar el valor rms de la presión, también ver los picos máximos y niveles mínimos de la medida. Los sonómetros normalmente no dan la medida en dB lineales si no que dan ya con la ponderación y son dBA/dBC etc.

⁸ Manuel Reccero López
Estudios y Controles para la Grabación Sonora
Instituto Politécnico Nacional México 1991

1.9.1 ¿Qué es el dBA o la ponderación -A-?

En el punto anterior hemos visto que el dB es un valor lineal, quiere decir que los valores medidos son los valores tomados como válidos sin que sufran ninguna alteración. Si los valores de presión acústica los medimos de esta forma, linealmente, aun siendo cierta dicha medida, tendrá poco valor en cuanto a la percepción del oído humano. El oído no se comporta igual para el mismo nivel de presión en diferentes frecuencias. Por ejemplo tomemos un sonido lineal en toda la banda de 20 Hz a 20 kHz tenemos en todas las bandas un nivel de 30 dB, si nuestro oído fuese lineal oíríamos lo mismo o mejor con la misma intensidad auditiva las frecuencias más bajas, que las medias y que las agudas. Sin embargo esto no es cierto el oído humano tiene una menor sensibilidad en las frecuencias más graves, y en las más agudas frente a las medias. Lo que más oímos por tanto son las frecuencias medias, y las que menos las más graves seguidas de las más agudas.

Como vemos es necesario encontrar una forma de ajustar los niveles de dB que hemos medido con la percepción que el oído tiene de los mismos según cada frecuencia. Esta corrección se realiza ponderando los dB medidos mediante una tabla de ponderación ya especificada y que se llama tabla "A". Los decibeles ya ponderados en "A" se representan como dBA y los no ponderados, llamados lineales, como dB.

Por ejemplo si en una frecuencia de 100 Hz hemos medido 80 dB, al ponderarlo pasaran a ser 60,9 dBA, esto quiere decir que un nivel de presión sonora de 80 dB en una frecuencia de 100 Hz es oída por nuestro sistema de audición como si realmente tuviese 60,9 dBA y no 80 dB. Además de la ponderación A existen la ponderación C y U que son poco empleadas.

1.9.2 ¿Cómo se suman los niveles de sonido?

Hemos visto que el decibelio es una función logarítmica y por tanto cuando hablamos de dB de presión sonora no es posible sumarlos sin más. Por ejemplo 30 dB + 30 dB no es igual a 60 dB si no a 33 dB como vamos a ver a continuación.

Para poder sumar dos decibeles podemos emplear la siguiente ecuación:

$$\text{Suma dB1} + \text{dB2} = 10 \log (10^{(\text{dB1}/10)} + 10^{(\text{dB2}/10)})$$

$$30\text{dB}+30\text{dB}=10\log(10^{(30/10)}+10^{(30/10)})$$

$$10\log(10^3 + 10^3) = 10\log (1000 + 1000) = 33 \text{ dB}$$

La suma de dos dB nunca puede ser mas de 3 dB mas que el mayor de los dos. Si la diferencia que hay entre los dos valores a sumar es mayor de 10 dB la suma no tiene valor práctico y se toma el valor del mayor de los dos. Por ejemplo si sumamos 20 dB + 10 dB el resultado será igual a 20 dB (aproximado). Solamente son significativos para la suma los valores que tienen una diferencia menor a 10 dB.

1.10 ¿A partir de que niveles el sonido es perjudicial?

Por encima de los 100 dBA es muy recomendable siempre que sea posible utilizar protectores para los oídos. Si la exposición es prolongada, por ejemplo en puestos de trabajos, se considera necesario el utilizar protectores en ambientes con niveles de 85 dBA, siempre y cuando la exposición sea prolongada. Los daños producidos en el oído por exposiciones a ruidos muy fuertes son acumulativos e irreversibles, por lo que se deben de extremar las precauciones. De la exposición prolongada a ruidos se observan trastornos nerviosos, cardiacos y mentales.

“Se han diseñado aditamentos para proteger lo oídos de los ruidos intensos. Hay protectores de diferentes tipos y tamaños: unos se ponen en los oídos como tapones para el agua, otros son externos y en ellos la parte que va por fuera, gruesa, abultada y lisa hace que se atenúe el sonido pues reflejan parte del sonido que incide sobre su superficie. Están forrados por dentro con un material poroso que absorbe el sonido.”⁹

1.11 En el estudio de grabación.

Para este capítulo se menciono en los objetivos que se mostraban dispositivos para la producción de música. Una parte importante del trabajo de la creación de música es la grabación de la composición, y para este caso hay varios modos de hacerlo, pero la grabación en un estudio o con unas condiciones cercanas a las de un de estudio siempre serán muy ventajosas. Se muestran aquí unas consideraciones, amén de otras que se harán más adelante, para lograr unas condiciones cercanas (no mucho, pero suficiente) a un estudio, para obtener grabaciones de buena calidad.

⁹ Domínguez A. Héctor Y Fierro G. Julieta
Los Sonidos de Nuestro Mundo
Dirección General de divulgación de la Ciencia UNAM 2003

1.11.1 ¿Qué es el Coeficiente de Absorción de un material?

El coeficiente de absorción de un material es la relación entre la energía absorbida por el material y la energía reflejada por el mismo. Dada esta formulación su valor siempre está comprendido entre 0 y 1. El máximo coeficiente de absorción está determinado por un valor de 1 donde toda la energía que incide en el material es absorbida por el mismo, y el mínimo es 0 donde toda la energía es reflejada.

El coeficiente de absorción varía con la frecuencia y por tanto los fabricantes de materiales acústicos dan los coeficientes de absorción por lo menos en resolución de una octava.

Sabiendo los materiales de una sala y sabiendo sus coeficientes de absorción podemos saber como sonará esa sala en cada frecuencia

1.11.2 ¿Qué es Eco, Reverberación y Resonancia?

Cuando se genera un sonido en el interior de un local las superficies que componen el mismo ocasionan una serie de diferentes efectos dependiendo de las características de dichas superficies.

Esto ocurre porque las ondas sonoras inciden en las diferentes superficies y estas las reflejan de diferente forma según su coeficiente de reflexión acústica.

Como es lógico, primero siempre se percibe el sonido directo, esto es, el sonido que nos llega a nuestro oído sin que se aún se halla reflejado en ninguna superficie. Una vez recibido el sonido directo, llegará a nuestros oídos, con un retraso de tiempo con respecto al sonido directo, el sonido reflejado por las superficies del local.

Tanto el retraso como el nivel sonoro del sonido reflejado dependen de las características físicas del local y sus superficies.

Si el retraso entre el sonido directo y el reflejado es mayor de 1/10 de segundo, nuestro sistema de audición será capaz de separar las dos señales y percibir las como tales, primero una y después la otra, esto es lo que se

entiende por eco. Por ejemplo: supongamos que estamos dentro de un local de grandes dimensiones y una persona que esta separada de nosotros a cierta distancia nos dice "HOLA"; primero llegara a nuestros oídos el "HOLA" del sonido directo, y en el caso de un eco este nos llegara como mínimo 1/10 segundo después, por lo tanto oiremos "HOLA.... (1/10 segundo mínimo)...HOLA", y lo interpretaremos efectivamente como dos mensajes diferentes separados por un intervalo de tiempo determinado. Sin embargo nuestro interlocutor únicamente ha articulado un "HOLA".

Cuando en la misma situación que en el caso anterior, el sonido reflejado nos llega con un tiempo inferior a 1/10 de segundo, nuestro sistema de audición no es capaz de separar ambas señales y las toma como una misma pero con una duración superior de esta. Normalmente esto se entiende como reverberación. La reverberación de un local se mide según su tiempo de reverberación (rt) en segundos y varia según la frecuencia de análisis que se utilice. Esto es debido a que los diferentes materiales que componen las superficies del local no se comportan por igual en todo el espectro sonoro, y por tanto los coeficientes de absorción de cada superficie de un mismo material varían según la frecuencia. Conociendo el tiempo de reverberación de un local podemos saber como se comportara el mismo en diferentes aplicaciones. Cuando el tiempo de reverberación alcanza valores muy altos con respecto al sonido directo, puede ocurrir un enmascaramiento de este y se puede perder la capacidad de entender la información contenida en el mensaje que se percibe.

La resonancia se ocasiona cuando un cuerpo entra en vibración por simpatía con una onda sonora que incide sobre el y coincide su frecuencia con la frecuencia de oscilación del cuerpo o esta es múltiplo entero de la frecuencia de la onda que le incide.

Conociendo estos conceptos podemos concluir que para obtener condiciones cercanas a las de un estudio de grabación, se considera:

1. Como no queremos grabar ruidos extraños, la primer condición para un recinto estudio es que debe ser silencioso, esto no se mencionó en estas definiciones, pero es bueno que el piso tampoco produzca ruido, así que alfombrarlo sería recomendable, también ventanas y pertas deberán dejar pasar la mínima cantidad de ruido que sea posible, y en general, el interior del estudio debe ser silencioso.
2. Para lograr el silencio en el interior, se deben emplear materiales con coeficientes de absorción altos en paredes y puertas, incluso en ventanas. Una buena opción para "forrar" las

paredes y las puertas es la espuma de poliuretano. Una opción más cara para lograr el silencio en el estudio, pero más efectiva es la fibra de vidrio, y mientras más gruesa mejor.

3. La reverberación, eco y resonancia no son deseables en un estudio y se evitan a partir de los materiales que recubren los interiores del recinto, pero en ocasiones para una grabación se necesitan de estos fenómenos en la grabación, se pueden dejar suceder o pueden añadirse de forma muy sencilla en la edición en la computadora de las señales grabadas, incluso antes de tenerse en la computadora las señales se pueden procesar y se agregan ecos y reverberaciones.

1.12 ¿Qué es la altura (tono) de un sonido?

Como ya sabemos la frecuencia es una entidad física y por tanto puede ser medida de forma objetiva por diferentes medios. Por contra la altura o tono de un sonido es un fenómeno totalmente subjetivo y por tanto no es posible medirlo de forma objetiva.

Normalmente cuando se aumenta la frecuencia de un sonido, su altura también sube, sin embargo esto no se da de forma lineal, o sea no se corresponde la subida del valor de la frecuencia con la percepción de la subida de tono.

La valoración subjetiva del tono se ve condicionada no solo por el aumento de la frecuencia si no también por la intensidad, y por el valor de dicha frecuencia. Para frecuencias inferiores a 1.000 Hz (incluida esta), si se aumenta la intensidad el tono disminuye, entre 1.000 Hz y 5.000 Hz el tono es prácticamente independiente de la intensidad que tenga, por encima de 5.000 Hz el tono aumenta si aumenta la intensidad.

La unidad de altura es el "Mel". (en ocasiones se utiliza el "Bark" equivalente a 100"Mels").

“Como podemos ver “El tono es una magnitud subjetiva y la frecuencia es una magnitud física medible y no guardan una correspondencia biunívoca, aunque la primera de ellas aumente o disminuya cuando lo hace la otra, la razón de variación no es igual para ambas; si pasamos de un tono de 1000 Hz a otro de 2000 Hz, recorreremos una octava, pero la sensación que se experimenta en este caso no es la misma que si se pasa de 7000 Hz a 8000Hz aunque en ambos casos se haya aumentado 1000 Hz. En realidad tendríamos que recorrer otra octava, es

decir pasando de 7000Hz a 14000Hz para sentir un efecto subjetivo análogo al primero.”¹⁰

1.13 ¿Qué es el timbre?

¿Por que podemos distinguir el sonido de un piano al de una trompeta, o el de un violín a una viola, o la voz de nuestro hermano con la de un amigo?

A menudo, cuando los especialistas en sonido hablan acerca de los sonidos, se refieren al espectro del sonido. La mayoría de los sonidos naturales no contienen una sola frecuencia de una sola amplitud, sino que contienen muchas frecuencias y cada una de ellas de una distinta amplitud. Esta calidad del sonido es lo que se llama timbre. Es lo que hace que el sonido de un trombón y el de un clarinete sean diferentes incluso si tocan la misma nota.

El timbre hace posible que cada instrumento pueda tener un color determinado y particular que lo distingue de otros aun cuando su espectro sonoro pueda parecer similar.

El timbre esta formado por un conjunto de frecuencias de alturas sonoras fijas (ámbito de formantes). *De forma sencilla se puede decir que el timbre lo forma la frecuencia fundamental del instrumento, más su composición armónica.*

La frecuencia fundamental de dos instrumentos diferentes puede ser la misma, pero su composición armónica es diferente y es lo que hace que los podamos distinguir. Por ejemplo: si generamos una frecuencia de 440 Hz con un piano y con una guitarra, aun cuando ambos están afinados en la misma frecuencia y generando la misma nota, cada uno suena diferente. Esto es debido a que cada instrumento genera una serie de armónicos según la construcción del propio instrumento, en el piano el arpa metálica y la caja generan una serie de armónicos con una serie de niveles sonoros que le dan su sonido característico. En la guitarra la caja, las cuerdas etc. le confieren a la misma frecuencia un sonido diferente.

La forma de ejecutar el instrumento y la intensidad hacen también que el timbre varíe, al hacer variar su composición armónica.

¹⁰ Domínguez A. Héctor Y Fierro G. Julieta
Los Sonidos de Nuestro Mundo
Dirección General de divulgación de la Ciencia UNAM 2003

“Las diferencias de timbre de dos sonidos musicales se explican por el hecho de que esos sonidos no son simples. Es muy difícil encontrar un sonido realmente simple.

La descomposición de un sonido periódico en serie de Fourier corresponde a una realidad para el oído ya que es capaz de funcionar como analizador armónico y percibir los sonidos que componen la señal compleja.”¹¹

1.14 Ecuallizadores

En una grabación o en una presentación en vivo es importante mantener niveles adecuados de las diferentes frecuencias que producen los instrumentos. Como vimos nuestro oído no es igualmente sensible a todas las frecuencias, es por eso que hay que darle realce a algunas frecuencias más que a otras. Para lograr esto disponemos de unos dispositivos denominados ecualizadores, que se usan para dar el realce mencionado para que nuestro oído pueda distinguir todo perfectamente. El fundamento de su funcionamiento y los tipos de ecualizadores se muestran a continuación.

1.14.1 ¿Qué es una octava, media octava y tercio de octava?

El término de octava se toma de una escala musical, se considera el intervalo entre dos sonidos que tienen una relación de frecuencias igual a 2 y que corresponde a ocho notas de dicha escala musical. Por ejemplo: si comenzamos con una nota como DO, la octava completa será: DO-RE-MI-FA-SOL-LA-SI-DO. Si el primer DO estaba afinado en 440 Hz el segundo estará en 880 Hz, ya que hemos indicado que en la octava hay una relación de frecuencias igual a 2.

En el caso de un ecualizador gráfico de una octava, las frecuencias centrales de los filtros podían ser las siguientes: 16 Hz - 31,5 Hz - 63 Hz - 125 Hz - 250 Hz - 500 Hz - 1kHz - 2 kHz - 4 kHz - 8 kHz - 16 kHz. En algunos casos la relación de 2:1 de la octava no se cumple exactamente.

¹¹ Domínguez A. Héctor Y Fierro G. Julieta
Los Sonidos de Nuestro Mundo
Dirección General de divulgación de la Ciencia UNAM 2003

Cuando se necesitan filtros de mayor precisión, de un ancho de banda mas estrecho, se puede dividir la octava en valores mas pequeños, por ejemplo: la media octava divide cada octava en dos, y por tanto tendremos el doble de puntos que en una octava, siguiendo con el ejemplo empleado en una octava tendríamos: 16 Hz - 22,4 Hz - 31,5 Hz - 45 Hz - 63 Hz - 90 Hz - 125 Hz - 180 Hz - 250 Hz - 355 Hz - 500 Hz - 710 Hz - 1kHz - 1,4 kHz - 2 kHz - 2,8 kHz - 4 kHz - 5,6 kHz - 8 kHz - 11,2 kHz - 16 kHz.

En el caso de un tercio de octava, cada intervalo de la octava se divide en tres partes con lo que tendremos tres veces mas de filtros para poder ajustar, quedando los cortes como siguen : 16 Hz - 20 Hz - 25 Hz - 31,5 Hz - 40 Hz - 50 Hz - 63 Hz - 80 Hz - 100 Hz - 125 Hz - 160 Hz - 200 Hz - 250 Hz - 315 Hz - 400 Hz - 500 Hz - 630 Hz - 800 Hz - 1 kHz - 1,25 kHz - 1,6 kHz - 2 kHz - 2,5 kHz - 3,15 kHz - 4 kHz - 5 kHz - 6,3 kHz - 8 kHz - 10 kHz - 12,5 kHz - 16 kHz

1.14.2 ¿Qué es un filtro de ancho de banda constante?

Un filtro de ancho de banda constante consiste básicamente en un filtro de banda estrecha sintonizable y constante. Esto nos permite seleccionar la frecuencia central que deseamos y también el ancho de banda del filtro. El ancho de banda del filtro viene dado por el siguiente valor:

$$w = f_2 - f_1$$

Siendo w = ancho de banda del filtro, f_2 = frecuencia superior y f_1 = frecuencia inferior.

Y la frecuencia central del filtro se obtiene normalmente de:

$$f_c = \text{Raíz Cuadrada}(f_1 * f_2)$$

La frecuencia central se puede ajustar a cualquier punto del espectro y mantienen siempre el mismo ancho de banda. Por ejemplo: supongamos que tenemos un filtro de ancho de banda constante con un ancho de banda de 20 Hz, si lo colocamos de forma que la frecuencia inferior sea 100 Hz (f_1) la superior será igual a 120 Hz y su frecuencia central será 109,54 Hz aproximadamente. Si ahora nos desplazamos a un margen de frecuencias superior, $f_1 = 4.000$ Hz, f_2 será igual a 4020 Hz y la frecuencia central será 4010 Hz. Como se ve el ancho de banda siempre es constante y no varia al variar el punto de trabajo del filtro.

1.14.3 ¿Qué es un filtro de ancho de banda proporcional?

Los filtros de ancho de banda proporcional son filtros que cumplen la remisa de $f_2/f_1 = \text{constante}$, o sea que si dividimos la frecuencia superior por la inferior siempre nos tiene que dar un valor que sea constante, por lo que el ancho de banda es proporcional a la frecuencia central. En el caso de un filtro de octava y de tercio de octava la relación de proporción es:

$$\text{Octava } f_2/f_1 = 2$$

$$\text{Tercio de Octava } f_2/f_1 = 2^{(1/3)}$$

Como es fácil deducir el ancho de banda de este tipo de filtros varia al variar la frecuencia, cuanto más subimos mayor es el ancho de banda, siempre manteniendo la proporción expresada según el filtro sea de octava, tercio etc.

Cada vez que subimos una octava doblamos el ancho de banda del filtro. Por ejemplo supongamos que estamos trabajando con un filtro de 1/3 de octava y nos situamos en la frecuencia de 100 Hz tenemos que la frecuencia inmediatamente inferior es 80 Hz y la superior 125, podemos obtener la relación de proporcionalidad del filtro según:

$$f_2/f_1 = \text{constante}$$

$$125/80 = 1,56$$

Podemos ver que tenemos un valor de 1,56 y que corresponde a un ancho de banda de

$$f_2 - f_1 = 125 - 80 = 45 \text{ Hz.}$$

Si ahora con el mismo valor de la proporción (1,56) colocamos el filtro en la frecuencia central de 200 Hz en lugar de los 100 Hz de antes, veremos que la proporción se mantiene pero el ancho de banda aumenta justo al doble:

$$f_2/f_1 = 250/160 = 1,56$$

$$f_2 - f_1 = 250 - 160 = 90 \text{ Hz}$$

Cada vez que subamos la frecuencia central aumentara el ancho de banda del filtro en la proporción expresada (1 octava = 2 y 1/3 octava = $2^{(1/3)}$). Cada vez que doblamos la frecuencia se dobla el ancho de banda del filtro. Por lo tanto este tipo de filtros resultan más precisos en las

frecuencias bajas que en las altas, ya que en frecuencias como 8 kHz el ancho de banda aumenta hasta 3.700 Hz mientras que como hemos visto para el mismo filtro en la frecuencia de 100 Hz tiene un ancho de banda de 45 Hz.

Los filtros proporcionales con resoluciones de octava, tercio etc. son los mas utilizados tanto en analizadores como en ecualizadores para fines musicales y acústicos.

1.15 ¿Qué es el ruido rosa?

El ruido rosa es un ruido cuyo nivel sonoro esta caracterizado por un descenso de tres decibeles por octava. Cuando el ruido rosa se visualiza en un analizador con filtros de octava, el ruido se ve como si todas las bandas de octava tuviesen el mismo nivel sonoro, lo cual es cierto, pero el ruido rosa no tiene el mismo nivel en todas las frecuencias.

Esto ocurre por que los filtros de octava, tercio etc., son filtros proporcionales y por tanto cada vez que subimos una octava, doblamos el ancho de banda y por ese motivo el ruido rosa decrece 3 dB por octava, justo la proporción en que aumenta el ancho de banda, el doble. De esta forma visualizamos el ruido rosa como un ruido de nivel constante en todas las bandas de octava.

Se utiliza para analizar el comportamiento de salas, altavoces, equipos de sonido etc. Es una señal conocida, mismo nivel en todas las bandas (sonido "plano"), y si lo amplificamos con un altavoz dentro de una sala podemos conocer datos sobre el comportamiento acústico del altavoz, la sala etc. Normalmente se genera entre 20 Hz y 20 kHz. Su sonido es muy parecido al que podemos oír cuando se sintoniza entre dos emisoras de FM, en el espacio que se recibe únicamente el ruido, es como un soplo.

1.16 ¿Qué es el ruido blanco?

El ruido blanco es un ruido cuyo nivel es constante en todas las frecuencias. Si lo visualizamos con un analizador con filtros de octava, veremos que el espectro mostrado no es lineal como hemos dicho que es el ruido blanco, si no que aumenta 3 dB por octava. Esto se debe al mismo fenómeno que con el ruido rosa, al doblar la octava se dobla el ancho de banda y si se tenemos el mismo nivel sonoro en todas las frecuencias, el nivel sonoro por octava se doblara y aumentara 3 dB con respecto al anterior.

1.17 ¿Qué es la disminución espacial del nivel sonoro?

Si tenemos una fuente sonora determinada, y estamos situados a una distancia de ella, al alejarnos o acercarnos el nivel de presión sonora varía según las características de la fuente, el lugar donde se encuentre y la distancia entre otros factores. Podemos calcular el nivel de presión acústica dentro de un local en cualquier punto con la siguiente fórmula:

$$L_p = L_w + 10 \log \left(\frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot r^2} + \frac{4}{R} \right)$$

L_p = Nivel de presión sonora.

L_w = Nivel de potencia de la fuente sonora en dB.

Q = Directividad de la fuente sonora.

r = distancia entre la fuente y el punto de medida en metros.

R = constante acústica del local (m^2).

En espacios al aire libre se considera que cada vez que se dobla la distancia entre la fuente sonora y el oyente, se disminuye el nivel sonoro en 6 dB. Por ejemplo supongamos que estamos escuchando un altavoz a una distancia de 10 metros, si utilizamos un sonómetro y medimos el nivel de presión acústica obtenemos un valor supuesto de 80 dB, si ahora nos distanciamos 10 metros más, o sea doblamos la distancia del punto inicial, obtendremos una lectura de 74 dB, 6 dB menos que en el primer punto, si por último nos alejamos 20 metros de este último punto, doblando así su distancia, estamos a 40 metros de la fuente, obtendremos también un descenso de 6 dB, tendremos por tanto, 68 dB.

Lo anterior visto es importante para grabaciones en exteriores, para espacios grandes o para sonidos ambientales, como el choque de una ola, el tronido de un relámpago, etc. Y ahora para el proceso de captación de estos sonidos, examinaremos los tipos de micrófonos que hay.

1.18 Micrófonos, tipos y utilización práctica.

“La grabación sonora comienza con un micrófono, un dispositivo que convierte la energía mecánica en eléctrica.”¹²

Realmente si hay un punto importante a la hora de estudiar el sonido, es el de su captación. Normalmente hoy en día la mayoría de los Técnicos dedicados al sonido realizan la mayor parte de su trabajo realizando tomas de sonido, bien sea para grabar un disco, como para un reportaje de noticias, la banda sonora de una película, una actuación en directo, o simplemente para la realización de una biblioteca sonora. Para poder captar los sonidos que nos rodean en nuestra vida diaria, necesitamos de algún sistema que nos permita transformar las variaciones de presión en el aire (ondas sonoras), en ondas eléctricas, de manera que estas las podamos manipular y almacenar sobre algún soporte bien sea en formato analógico o digital.

Los micrófonos cumplen este cometido. El micrófono es un transductor que nos permite realizar esta conversión entre las variaciones de presión y variaciones de nivel en una corriente eléctrica. A la hora de estudiar los diferentes tipos de micrófonos, podemos hacerlo, bien sea por su tipo de funcionamiento, o bien por la forma en que recoge el sonido, dado que no presentan la misma sensibilidad en todos los ángulos con respecto a la fuente sonora, forma que se representa por medio de un diagrama polar.

En primer lugar vamos a ver lo que es cada parámetro en relación a un micrófono, y posteriormente veremos los diferentes tipos de funcionamiento y sus aplicaciones prácticas.

1.18.1 El diagrama polar.

“La respuesta direccional de un microfono se representa con un diagrama polar. Esto es, una grafica circular en la que el centro representa

¹² Glyn Alkin
Grabación y reproducción de sonido
Centro Universitario de Estudios Cinematográficos
UNAM

un micrófono. La distancia del centro a la línea punteada (azul) representa la sensibilidad de cada ángulo con respecto al eje frontal.¹³

El diagrama polar de un micrófono refleja la sensibilidad con que es capaz de captar un sonido según el ángulo con que le incida este. Para determinar el diagrama polar de un micrófono, se utiliza una cámara anecoica (cámara aislada y que no tiene reverberación) en la que se coloca el micrófono y frente a él una fuente sonora que genera un tono a una frecuencia determinada. Teniendo el micrófono en el eje de 0° sobre la fuente sonora, se mide la tensión de salida del mismo. A esta tensión se le llama "tensión de referencia a 0 dBs" y se toma como tensión de referencia. A continuación se va rotando el micrófono sobre su eje variando el ángulo de incidencia con respecto a la fuente sonora, y se van anotando los valores de tensión que obtenemos en su salida. En la figura 3 podemos ver una muestra más clara de la forma en que se realiza un diagrama polar de un micrófono

¹³ Glyn Alkin
Grabación y reproducción de sonido
Centro Universitario de Estudios Cinematográficos
UNAM

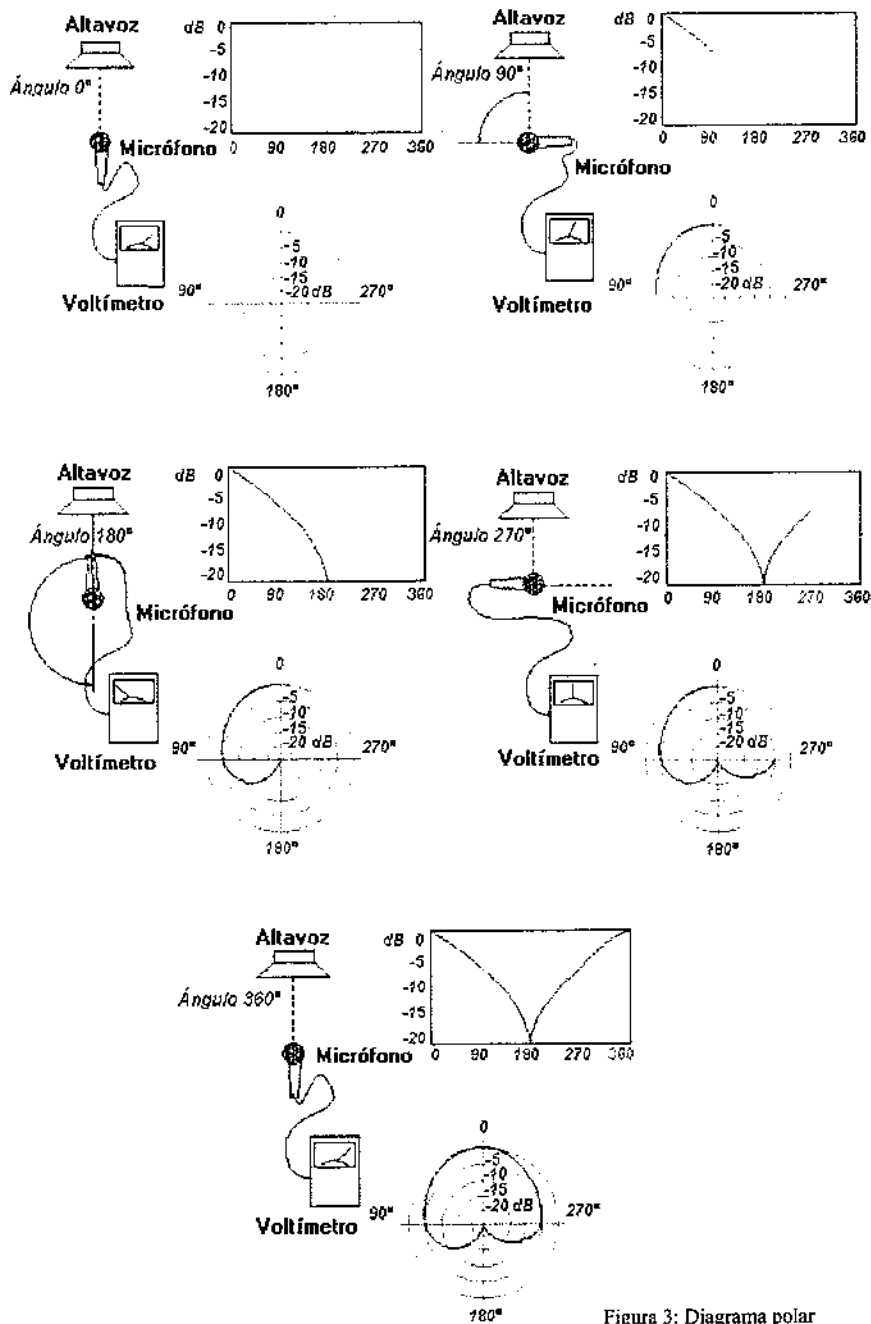


Figura 3: Diagrama polar

Utilizando este sistema hay que repetir la misma operación para diferentes frecuencias y así poder saber el comportamiento que tiene en varias bandas de frecuencias. También se puede realizar el diagrama polar mediante el sistema de espectrometría de retardo de tiempos, donde se realiza una medida de la respuesta en frecuencia del micrófono cada 10° y después se procesa obteniéndose los diagramas a las frecuencias deseadas.

Como hemos podido ver el diagrama polar de un micrófono nos da la información necesaria para saber de que forma se va a comportar el micrófono con los sonidos dependiendo de donde le vengan estos. Los diagramas polares se pueden dividir básicamente en tres, el omnidireccional, el bidireccional y el unidireccional (estos a su vez se dividen en cardioides, supercardioides e hipercardioides). Ver figura 4 y 5

El micrófono unidireccional se puede clasificar como aquel que tiene una mayor sensibilidad a los sonidos que el vienen de frente a la cápsula con un ángulo relativamente amplio. Este tipo de diagrama polar, se puede subdividir en tres que son, el cardiode, el supercardioido y el hipercardioido. Cada uno de ellos va presentando un diagrama polar cada vez mas estrecho y por tanto se van haciendo más insensibles a los sonidos que les llegan desde la parte posterior así como del lateral. Ver figura

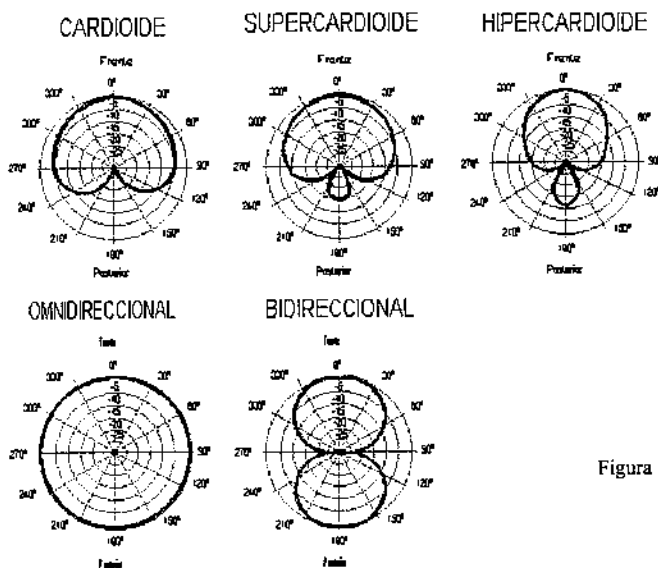


Figura 4

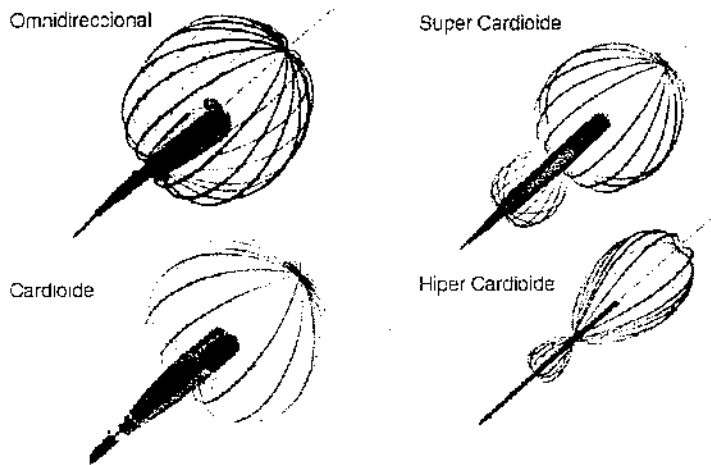


Figura 5

En el caso del diagrama polar omnidireccional, tal y como su nombre lo indica, este recibe prácticamente con la misma sensibilidad cualquier sonido independientemente del punto donde proceda el mismo, su diagrama es por tanto circular. El bidireccional presenta una gran sensibilidad en el frente, con un ángulo amplio, y una imagen simétrica en la parte posterior, o sea que es menos sensible a los sonido que le llegan desde los laterales y mas sensible a los que le llegan desde el frente y la parte posterior.

Un factor importante es que el micrófono, con un diagrama polar determinado, lo mantenga lo más igualado posible en todas las frecuencias, dado que si no, se presentan coloraciones en el sonido debido al acercamiento o separación desde o hacia la fuente sonora. Si tenemos unos diagramas polares uniformes para diferentes frecuencias, sabremos que la respuesta en frecuencia del micrófono no variara en exceso según los ángulos de incidencia del sonido. Una vez visto lo que es el diagrama polar del micrófono y los diferentes tipos que hay, vamos a ver para que podemos utilizar cada uno de ellos.

Los micrófonos omnidireccionales son recomendables cuando se necesite alguno o varios de los siguientes usos:

- Captación del sonido en todas las direcciones.
- Captación de reverberaciones en locales, cámaras etc.
- Exclusión máxima del ruido mecánico generado por viento etc.

- Respuesta amplia en las frecuencias mas bajas, sobre todo con micrófonos de capacitor.

Los micrófonos direccionales (Cardioides, supercardioides e Hipercardioides) los usaremos en los siguientes casos:

- Rechazar al máximo la acústica que tenga el recinto donde se realiza la toma.
- Rechazar el ruido de fondo.
- Utilizar técnicas especiales de grabación con parejas de micrófonos (estéreo coincidente)
- Captación de sonidos lejanos.

1.18.2 La sensibilidad

La sensibilidad de un micrófono es la relación entre la tensión de salida obtenida en el mismo y la tensión de referencia que provoca dicha salida en el micrófono. Normalmente se mide en decibeles referenciados a 1 voltio con una presión de 1 dina/cm² y la señal de referencia usada es un tono de 1000 Hz a 74 dB SPL.

Como es lógico cuanto mayor sea la sensibilidad de un micrófono, mejor. La sensibilidad del micrófono no influye en su calidad sonora, ni en su respuesta en frecuencia, únicamente es importante a la hora de su uso ya que un micrófono de baja sensibilidad nos fuerza, al utilizar un preamplificador para el micrófono, a utilizar un nivel mayor de ganancia de entrada para dicho micrófono, aumentando de esta manera el ruido de fondo que produce la electrónica de los preamplificadores.

Para las mismas condiciones si tenemos un micrófono con una sensibilidad mayor, necesitaremos menos ganancia en la entrada del preamplificador con lo que reduciremos el nivel de ruido de fondo. Puede parecer que esto no tiene excesiva importancia, y puede que no la tenga cuando únicamente se utiliza un micrófono y lo que se trata de grabar o amplificar no es muy importante. Sin embargo cuando se utilizan muchos micrófonos, caso muy típico en grabaciones y actuaciones en directo, el nivel de ruido de fondo producido en cada canal se va sumando y el resultado puede ser realmente problemático, sobre todo cuando grabamos en soporte digital.

1.18.3 Ruido propio

El ruido propio de un micrófono es el que produce cuando no hay ninguna señal externa que excite el micrófono. Esta medida se realiza normalmente en una cámara anecoica y se especifica como una medida de presión sonora y por tanto en dB SPL, equivalente a una fuente sonora que hubiese generado la misma tensión de salida que el ruido producido por el micrófono.

El nivel indicado en dB SPL se especifica con la ponderación A, de forma que se adapta a la curva de nuestro oído ajustando las frecuencias mas graves y mas agudas.

Se puede considerar como excelente un nivel de ruido de 20 dBA SPL, como valor bueno sobre unos 30 dBA SPL, y como malo 40 dBA SPL.

A la hora de comparar varios micrófonos es importante tener en cuenta este valor de ruido propio. Cuanto menos ruido tengamos mejor. Hay que acordarse que después, en la practica no usaremos un micrófono solo, usaremos varios y los niveles de ruido se van sumando.

1.18.4 Relación Señal Ruido (S/R)

La relación señal ruido (S/R) representa realmente la diferencia entre el nivel SPL y el ruido propio del micrófono. Cuanto mayor sea el SPL y menor el ruido mejor será la relación señal ruido, y por contra si el nivel de SPL es menor y el ruido propio aumenta, la relación será menor y por tanto peor.

Cuanto mayor sea la relación señal ruido mejor. Nos indica que porcentaje de la señal SPL está por encima del ruido de fondo. Si tenemos una SPL de 100 dB y un ruido propio en el micrófono de 30 dB, la relación señal / ruido será de 70 dB. Para una señal de 100 dB una relación señal/ruido de 80 dB es muy buena y 70 dB es buena.

1.18.5 Respuestas de frecuencias

La respuesta en frecuencia de un micrófono indica la sensibilidad del mismo a cada frecuencia. Como hemos visto al principio al hablar de los diagramas polares, los micrófonos no tienen la misma sensibilidad para cada ángulo de incidencia ni para cada frecuencia, por tanto es difícil conseguir una respuesta uniforme en todo el espectro. Como es lógico hay que observar que la longitud de un sonido influye o tiene una relación en el comportamiento del diafragma según la relación de tamaño que haya entre ambos.

Con todos los micrófonos se entrega una hoja con la curva de respuesta en frecuencia del micrófono, teniendo en un eje (x) la frecuencia de 20 Hz a 20 KHz. y en el otro eje (y) los decibelios. Ver figura 6. Como es lógico depende lo que deseemos grabar buscaremos el micrófono que sea más plano en la zona del espectro que estemos tratando de grabar.

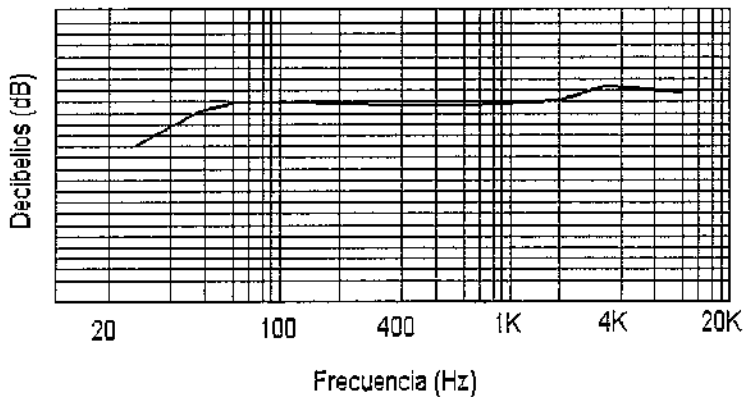


Figura 6: Curva de respuesta en frecuencia

1.18.6 La impedancia

La impedancia en un micrófono es la propiedad de limitar el paso de la corriente, como ya sabemos se mide en Ohmios. Normalmente en los micrófonos se mide sobre una frecuencia de 1KHz y en micrófonos de baja impedancia, esta, suele valer 200 Ohmios. Los micrófonos más habituales son los de baja impedancia, considerados hasta unos 600 Ohmios. También

existen los de alta impedancia que suelen tener un valor típico de 3000 Ohmios y más.

La diferencia entre uno y otro radica en que a la hora de conectar un cable para unirlo a la mesa de mezclas o al amplificador, los de baja impedancia al oponer poca resistencia a la corriente que circula, permiten utilizar cables de longitud muy grande mientras que los de alta impedancia al restringir de forma mayor el paso de la corriente, solo se pueden usar con cables de corta distancia. Hoy en día prácticamente nadie usa micrófonos de alta impedancia salvo en gamas muy baratas de precio o en casos específicos.

1.19 Clasificación de los micrófonos según su transductor.

1.19.1 Bobina móvil

Son los llamados normalmente como "dinámicos". Estos micrófonos consisten en un diafragma de plástico "mylar", unido a una bobina que se desplaza dentro de un campo magnético creado por un imán polarizado. Cuando la membrana se mueve como consecuencia de la presión del aire sobre ella, la bobina que es solidaria se mueve también dentro del campo magnético y produce una corriente que es proporcional al desplazamiento de la membrana. Este tipo de micrófono es muy utilizado dada su robustez y que no necesita alimentación externa para su funcionamiento. Por contra su sensibilidad y linealidad de respuesta no es tan buena como en otros tipos de micrófonos como veremos. Hay micrófonos de bobina móvil que utilizan dos membranas, una en la parte frontal y otra en la parte posterior, ambas señales se separan mediante un divisor de frecuencias. De esta forma se consigue mejorar mucho la respuesta en frecuencia del micrófono.

"Los microfonos de bobina movil son resistentes, pueden tener una respuesta omnidireccional o unidireccional y son de buena calidad."¹⁴

¹⁴ Glyn Alkin
Grabación y reproducción de sonido
Centro Universitario de Estudios Cinematográficos
UNAM

1.19.2 De cinta

En este sistema se utiliza una cinta metálica muy ligera que esta expuesta a las ondas sonoras tanto por delante como por detrás. Dicha cinta se halla montada dentro de un campo magnético permanente creado por un imán. Cuando la cinta vibra como consecuencia de las presiones de las ondas sonoras, se crea una corriente que es similar a la velocidad de desplazamiento de dichas ondas sonoras, por esto a veces se les llama también micrófonos de velocidad. Su diagrama polar suele ser bidireccional aunque se pueden conseguir cardioides también. Su respuesta en frecuencia es muy buena. Únicamente hay que señalar que son muy sensibles a los golpes y malos tratos por lo que únicamente se utilizan en estudio y con buen trato.

“Los micrófonos de cinta tienen excelentes características de respuesta, pero son propensos a provocar ruido y a “tronar” con el viento.”¹⁵

1.19.3 Electroestáticos o de capacitor

Los micrófonos electrostáticos utilizan otro tipo de transductor basado en el funcionamiento de un capacitor. Para ello utilizan dos membranas, una fija, la posterior, y otra separada de la primera por una capa de aire que es la que se mueve cuando le inciden las ondas sonoras. El capacitor que forman ambas placas aisladas por el aire se alimenta con una tensión externa al micrófono llamada alimentación Phantom o fantasma.

Cuando la membrana superior se desplaza como consecuencia de las ondas sonoras, la distancia entre ambas placas varia y por tanto varia también la capacidad del supuesto capacitor, al variar esta, también varia la tensión que circula por él. Para poder aprovechar estas variaciones de tensión se necesita montar un preamplificador junto a la cápsula de forma que por una parte adapte la impedancia, dado que la del capacitor es muy alta, y por otra el nivel de la señal para poder ser útil. El preamplificador también hace uso de la alimentación externa para poder funcionar.

¹⁵ Glyn Alkin
Grabación y reproducción de sonido
Centro Universitario de Estudios Cinematográficos
UNAM

“Los microfones de capacitor pueden ser pequeños y compactos con excelentes características en su respuesta.”¹⁶

Hay micrófonos electrostáticos que tienen un diafragma plástico con una carga permanente y que por ello no necesitan alimentación externa para funcionar, sin embargo el preamplificador que sigue siendo necesario si la necesita. Esto a veces se resuelve con una pequeña pila incluida en el mismo micrófono, así se evitan utilizar la alimentación Phantom o Fantasma.

Al no tener que cargar con la bobina, el diafragma de estos micrófonos es mucho más sensible y por tanto son capaces de recoger sonidos muy tenues sin ningún problema. Son micrófonos de excelente calidad y únicamente hay que tener en cuenta que la humedad puede dejar gotas de rocío sobre la membrana y generar un ruido tipo a fritura que se irá cuando desaparezca toda la humedad.

En un principio, para realizar la electrónica del preamplificador y de la fuente de alimentación se utilizaban bulbos, ya que no había transistores ni mucho menos circuitos integrados. Por ello ambas, alimentación y preamplificador eran muy voluminosas y tenían los inconvenientes ya conocidos de la utilización de los bulbos. Sin embargo tenían un sonido muy especial que aun hoy en día se busca y por ello existen modelos hoy en día a bulbos, y aunque su precio suele ser elevado, su calidad sonora es muy "especial" y registran el sonido de una forma mas "cálida".

1.20 Tarjetas de audio

Los micrófonos son dispositivos muy importantes para la captación del sonido, no son los únicos dispositivos, existen también otros como las guitarras eléctricas, pero en general siguen el principio de operación del micrófono. Aparte de los dispositivos para la captación hay muchos para el tratamiento, por ejemplo, el ecualizador, que ya se menciono y otros que sirven para dar control a las entradas de audio o para mezclar varias fuentes de audio. Pero para el caso de la captación de sonido por parte de la computadora el dispositivo que se tiene para tal fin es la tarjeta de audio.

¹⁶ Glyn Alkin
Grabación y reproducción de sonido
Centro Universitario de Estudios Cinematográficos
UNAM

Este dispositivo en muchas ocasiones contiene funciones como las de varios dispositivos para el control y el tratamiento de las señales de audio. Estos dispositivos se conectan en la computadora, y su desempeño no solo depende de esta, ya que también hay varios tipos de tarjetas y con muchas diferencias de funcionalidad unas de otras. A continuación se muestra una tarjeta de audio y sus principales características para mejor entendimiento.

La tarjeta de audio apropiada dependerá de las necesidades del usuario, porque hay tarjetas muy completas, pero que ofrecen características de funcionalidad que al usuario no le son necesarias, esto no sería un obstáculo sino fuera por el precio que implica tener estas características. Por eso es importante saber que uso va a tener la tarjeta de audio para saber cual es la mejor para nosotros.

1.20.1 Tarjeta de Sonido Sound Blaster Audigy2

Alta definición en calidad de audio para Reproducción y Grabación

Conversión Digital-a-Análoga de 24bits durante la reproducción con índices de muestreo (muestras) de 8 hasta 96kHz en modo 5.1 y hasta 192kHz en modo estereo.

Conversión Digital-a-Análoga de 24bits durante la grabación en 8 hasta 24-bit a índices de muestreo de 8 hasta 96kHz.

Entrada SPDIF (Sony/Philips Digital Interface) de calidad hasta 24-bit/96kHz

Salida SPDIF hasta 24-bit a 48, o 96kHz.

Controladores ASIO para baja latencia (=2ms) reproducción y grabación multi-pista en calidad de 16-bit/48kHz.

Tecnología de Sonido 3D y Sonido de Avanzada

Decodificación de sonido Dolby Digital a 5.1 (modos digitales o análogos) o decodificación Dolby Digital EX a 6.1 (solo modo analógico) canales para bocinas (parlantes).

Aceleración por hardware de EAX y EAX ADVANCED HD para juegos.

Motor de Calidad Profesional para Efectos de 32-bit con soporte para efectos digitales en tiempo real como reverb y coros a través de cualquier fuente de audio.

Sintetizador Wave-Table y Características MIDI

Sintetizador por Hardware de Creative (Canales 2x16) con 64- voces polifónicas presentando la tecnología patentada E-MU de 8-puntos de interpolación para la exacta reproducción de samples.

Sintetizador por Software de Creative- wave-table multi timbral (16 canales)

Conectividad SB1394/FireWire

IEEE 1394, FireWire, y i-Link® son interfaces compatibles con un índice de transferencia de hasta 400Mbps.

Conectores On-Board Sound Blaster Audigy 2

- . Salida (Frontal, Posterior, Central, Subwoofer, Central Posterior)
- . Soporta Salida Digital para 5.1
- . Entrada de Línea
- . Entrada de Micrófono
- . Puerto SB 1394/FireWire
- . Entrada de Dispositivo de Contestador Telefónico
- . Entrada Analógica/Digital de Audio CD
- . Extensión de Puerto 15-pin MIDI / Joystick
- . Conector interno SB 1394/FireWire a Drive Interno de la Sound Blaster Audigy 2 (Opción de Actualización)
- . Extension AD_EXT a Drive Interno de la Sound Blaster Audigy 2 (Opción de Actualización)

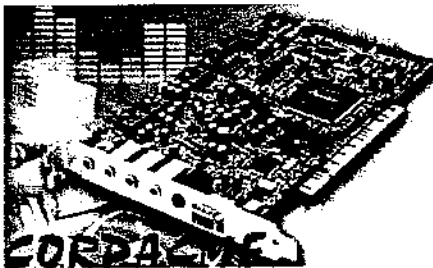


Figura 7: Tarjeta de sonido Sound Blaster Audigy 2

Existen tarjetas de audio mucho más completas que esta y otras con algunas funciones de menos. Las tarjetas más completas como ya se menciono pueden tener usos que no son los que se requieren de ellas y sería solo un lujo tenerlas, pero puede suceder que se necesiten, por ejemplo, si se va a editar el audio para un DVD con calidad de 24 bits (o más) y 96 Khz de frecuencia de muestreo (o más), (estas características se verán más adelante), y para 5.1 canales, se necesitara obviamente una tarjeta de altas prestaciones.

1.21 Conclusión

En este capítulo se revisó la naturaleza del sonido lo cual nos da pie para seguir con otros conceptos del sonido, pero de la forma en que este interactúa con las computadoras.

Los conceptos que se vieron en este capítulo servirán para que el interesado en el tema de la creación musical utilizando las computadoras haga uso de ellos para obtener mejor sonido en cada producción musical realizada posteriormente en la computadora.

Las características físicas del sonido son importantes cuando se quiere editar en audio digital por ejemplo una señal captada con micrófonos, para mejorarla o para modificarla. En el estándar MIDI también se pueden aplicar estos cambios, y estos son temas que veremos en el siguiente capítulo.

Capítulo 2 : La Computadora y el Sonido

2.1 Introducción

Nuevamente la materia prima de éste trabajo es el sonido, antes se vio el sonido como fenómeno físico, ahora se verá como el mismo fenómeno físico pero convertido por la computadora como un dato entrante a ella o como una información proveniente de ella.

En este capítulo abordaremos el audio digital del tipo PCM, y los datos para audio sintetizado del estándar MIDI. Desde estos dos tipos de manejo de audio se desprenden otros, por ejemplo para el MIDI el MOD y para el audio digital de forma de onda (wave) PCM, otros muchos, por ejemplo el formato de audio digital mp3, ninguno de estos es el caso de estudio de ésta tesis además de que no ofrece mayor beneficio conocerlos a fondo para la creación de música utilizando la computadora.

En este capítulo se verá la forma en que la computadora se puede usar como herramienta para la composición de música, sobre todo del modo sintetizado por la computadora, esta práctica es de gran utilidad para los músicos profesionales, ya que pueden tener el trabajo impreso y tocarlo y también pueden oírlo procedente de la computadora, lo que también ofrece una gran ventaja al componer. Veremos la forma en que el audio digital es procesado en la computadora y tendremos el conocimiento por ejemplo de su almacenaje que será muy importante para cuando queramos hacer una grabación de audio digital en la computadora.

2.2 Audio digital introducción

La primera grabación con la computadora puede iniciarse de manera muy sencilla, por ejemplo; para una grabación que no requiera de gran extensión de tiempo, con la grabadora de sonidos del sistema operativo Windows. Con esta herramienta se pueden hacer grabaciones con características similares de otros programas para la grabación de audio. La grabadora de sonidos de Windows tiene limitación por el tiempo de grabación, es un programa por lo tanto que sirve para hacer grabaciones cortas, tales como, diálogos cortos, sonidos de alarma o exclamación, música para inicio y fin del sistema operativo, etc. Aun así las grabaciones pueden tener calidad igual a la necesaria para una grabación musical de tipo profesional o calidades que permitan el almacenamiento utilizando menos espacio de almacenamiento.

2.2.1 Almacenamiento

¿Por qué es importante el espacio de almacenamiento? La respuesta se deriva de la explicación de la forma en que se procesa el sonido en la computadora y se convierte en una señal digital.

Una señal de sonido analógica se compone de una serie de movimientos oscilatorios continuos, es decir, que se produce ininterrumpidamente. Por lo tanto puede decirse con toda seguridad el estado del movimiento oscilatorio para cualquier intervalo de tiempo y con cualquier precisión.¹⁷ La computadora necesita saber los estados de esta señal de movimientos oscilatorios para momentos determinados y con exactitud. Para poder hacer esto la computadora toma muestras de la señal en intervalos de tiempo regulares. A estos intervalos de tiempo con que toma las muestras se les llama frecuencia. Y al procedimiento de almacenar y procesar las muestras se le llama muestreo o *sampling*.

2.2.1.1 Muestreo

“El muestreo consiste en la toma de muestras (voltajes) de la señal analógica un número determinado de veces por unidad de tiempo. Dichas

¹⁷ Markus Van Weil
La Música con el PC
Maracombo

muestras constituyen impulsos que son una representación de la forma de onda original.¹⁸

Tomando como referencia en nivel de voltaje que genera una señal de audio; por ejemplo la señal proveniente de un micrófono, la señal se evalúa y muestrea con respecto a este valor de voltaje, los valores muestreados corresponden a un valor numérico en un rango de valores, que por ejemplo, un micrófono es capaz de crear. Una muestra de la señal podría ser 1.2 volts. Dado que la computadora solo maneja el sistema binario (1,0) debe convertir estos datos de la señal en datos de formato binario.

Para convertir una señal a digital hay que tener también en cuenta la frecuencia de la señal de audio. Esto, para obtener en una señal digital una representación de la señal analógica original sin pérdidas de datos o calidad. Para esto existe el teorema de muestreo que dice que para obtener de una señal analógica una señal digital y, las muestras que conforman la señal digital obtenidas puedan reproducirse sin pérdida de información de la señal analógica original, la frecuencia de muestreo debe ser *por lo menos* igual a dos veces la máxima frecuencia de la señal analógica.

El oído humano es capaz de percibir frecuencias de hasta 20 000 Hz, y si se toma el teorema de muestreo para una conversión analógico-digital, se necesita de una frecuencia mínima de 40 000 Hz, para que la señal así convertida no pierda información de la señal analógica original. Es decir, si se produce un sonido de esta frecuencia de 20 000 Hz y el muestreo de ésta señal de audio es menor de 40 000 Hz, la señal digital obtenida tendrá variaciones que harán que no se escuchen igual ambas señales, es decir, contendrá distorsión de información.

Tener una frecuencia de 40 000 Hz significa que hay de tomar 40 000 muestras de la señal analógica por segundo. Se puede reducir el número de muestras por segundo, pero con esto también se reduce la calidad de la señal obtenida.

Hay muchas variaciones para convertir una señal analógica en digital en donde se involucra la frecuencia de muestreo, pero involucran una pérdida de calidad si se utilizan frecuencias bajas. Por ejemplo la frecuencia de muestreo de los teléfonos que utilizan codificación analógico

¹⁸ Iglesias Simon, Pablo
Postproducción Digital de Sonido por Computadora
Alfaomega RA-MA 2002

digital es de 11 025 Hz, la frecuencia de muestreo con calidad de radio de 22 050 Hz, o con calidad de CD que es de 44100 Hz.

Cada una de estas frecuencias de muestreo originan diferentes calidades de sonido, pero tienen propósitos diferentes, por ejemplo, la calidad de CD es especialmente utilizada cuando se necesita alta fidelidad entre las señales analógicas de entrada y las señales digitales generadas, o por ejemplo la frecuencia de muestreo telefónica comprende el rango de frecuencias de la voz humana, de tal forma que la voz se puede escuchar bien pero otros sonidos de distintas frecuencias no se escucharán tan bien, para su propósito entonces le es suficiente.

Además de esto, para las señales de audio hay otro parámetro que considerar. Una señal de audio puede ser monofónica o estereofónica, y en muchas ocasiones las señales son del tipo estereofónicas, con lo que la señal se convierte en una señal de más de un solo canal, y cada canal requerirá del mismo número de muestras, por ejemplo con calidad de CD para el canal derecho se necesitan 44100 muestras por segundo, y para el canal izquierdo se necesitan 44100 muestras por segundo, por lo tanto por un segundo de grabación de audio con calidad de CD en modo estereofónico se necesitan 88200 muestras de audio, y cada una requiere su espacio. El espacio que requiere cada muestra también se determina con la profundidad de intervalos de cuantificación.

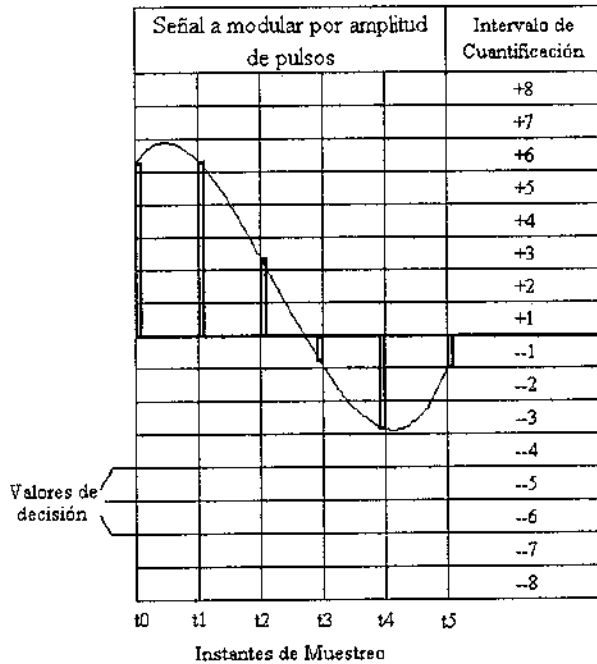
2.2.1.2 Cuantificación

¿Qué es la cuantificación? La cuantificación es un procedimiento en el que le damos un valor a las muestras de la señal analógica, pero este valor lo damos en forma binaria. Le damos éste valor porque, aunque ya esta muestreada la señal, ésta sigue siendo una representación analógica de la señal original, solo que en muestras, y además la computadora solo la puede procesar en formato binario. La cuantificación consiste en descomponer el margen total de las posibles amplitudes de la señal en intervalos de cuantificación.

“La cuantificación consiste en la asignación de un valor numérico a cada uno de los pulsos generados en el muestreo de acuerdo con su voltaje. Es decir, el proceso de cuantificación implica asignar a cada muestra un valor dentro de la escala determinada.”¹⁹

¹⁹ Iglesias Simón, Pablo
Postproducción Digital de Sonido por Computadora
Alfaomega RA-MA 2002

El principio de la cuantificación se muestra en la figura 1, habiéndose utilizado solamente 16 intervalos de cuantificación iguales para mayor claridad. En el margen positivo de la señal se encuentran los intervalos +1 a +8 y en el margen negativo los intervalos -1 a -8.



Cuantificación uniforme de las muestras de una señal analógica

Figura 1

Para cada muestra se determina el intervalo en el que queda incluida, estando separado cada intervalo de cuantificación del siguiente por un valor de decisión. La señal analógica tendrá varias muestras que caigan en el mismo intervalo de cuantificación. Cuando se reproduce ésta señal muestreada y digitalizada se procesa de forma inversa, y muestras digitales se convierten a muestras analógicas, pero al haber existido diferencia en los valores tomados de los valores reales de las muestras analógicas en un principio, se producen pequeñas variaciones respecto a las muestras de la señal analógica original. Se produce entonces la distorsión que antes mencionamos por estas diferencias que existen entre la señal original y la señal muestreada.

La variación por cada muestra puede llegar a ser, como máximo, medio intervalo de cuantificación. Estas variaciones pueden ocasionar una distorsión de cuantificación que se manifiesta por un ruido superpuesto a la señal útil. La distorsión de cuantificación es tanto menor cuanto mayor sea el número de intervalos previstos. Haciendo los intervalos lo suficientemente pequeños, la distorsión será mínima y el ruido imperceptible. El ruido se podría hacer totalmente imperceptible si se obtuviera una señal con un infinito número de niveles de cuantificación, y una frecuencia muy alta. Esto no resulta práctico, por la cantidad de muestras que se generarían, y además por que el oído humano no es capaz de detectar niveles de ruido muy bajos, esto es, si la relación de señal a ruido es grande, donde el ruido producido es aquel que el oído no alcanza a percibir, entonces ya solo se escucha la señal de audio, y esto se puede lograr con una frecuencia determinada y con un número finito de niveles o intervalos de cuantificación.

Estos intervalos existen en la amplitud completa de la señal analógica, y pueden ser cuantos queramos, pero se han aceptado muestras de 8 bits y de 16 bits como estándares, y otros más. ¿Que significa esto? Cada bit en un número binario nos representa un dígito, por ejemplo un número de 8 bits es 11100101.

Y como vimos antes, en las muestras de la señal cada valor de voltaje de un instante lo podemos representar como un número binario y que puede ser como se menciona 8 o 16 bits e incluso 20, 24 o 32bits.

¿De que nos sirve esto? La señal analógica es continua en el tiempo, y cambia con el tiempo también. Cuando llega el momento de tomar una muestra de la señal ésta puede tomar cualquier valor de voltaje, (un ejemplo es que tomará un valor de un número irracional, lo que nos llevaría a tener un número con infinitas cifras después del punto decimal), pero no se puede asignar cualquier valor porque esto llevaría a tener muestras de gran tamaño (numérico) y que requerirán de un mayor número de bits. Por eso a cada muestra no se le asigna su valor real sino que se le asigna el valor del intervalo de cuantificación en el que se encuentre, de esta manera se trabaja con un número fijo de bits.

La señal tiene un máximo de amplitud que puede alcanzar, se toma ese máximo, y es aquí donde entra la profundidad de bits. Con un número de 8 bits se puede alcanzar una profundidad de 256 valores posibles. Entonces si el máximo voltaje de la señal es de 4 volts por ejemplo, esos 4 volts se dividen entre 128 (más adelante vemos por qué) lo que nos da 0.03125 volts, eso es lo que mide cada intervalo, y cuando se tiene que

tomar una muestra se evalúa el intervalo en el que está y la muestra toma el valor (de entre los 256 posibles) del que le quede más cerca. Para el caso de la cuantificación con 16 bits los valores posibles que se pueden tomar son 65 536.

En la figura que vimos la profundidad es de cuatro bits, y el número de intervalos que se pueden tener son 16, y como se ve en la figura la mitad se utilizan para el rango positivo y la mitad para el rango negativo. Antes mencionamos que la señal podía ser de 4 volts, estos los tendrá tanto en el positivo como en el negativo. Cabe hacer la aclaración de que el positivo y el negativo existen en la señal por conveniencia, el nivel de 0 no tiene que estar forzosamente en el nivel de cero volts. Si tenemos 8 bits el número de niveles de cuantificación es de 256 donde la mitad serán positivos y la mitad serán negativos, y lo mismo pasa para 16 bits. En este caso por ejemplo, se tienen 32 768 niveles de cuantificación en el positivo y lo mismo para el negativo, si la señal tiene un máximo de 4 volts, estos 4 volts divididos entre 32 768, dan como resultado que el tamaño del intervalo sea de 0.00012207 volts. A este nivel ya no es posible distinguir el ruido superpuesto a la señal obtenida.

2.2.1.3 Codificación

Como último paso para la digitalización de una señal analógica esta la codificación del valor de las muestras en los intervalos de cuantificación. En este paso los valores de las muestras que antes tenían un valor numérico de un voltaje generado por la fuente emisora de sonido, ahora tendrán otro valor, pero esta vez será un número en formato binario. Este valor estará dado por el intervalo de cuantificación en el que se haya encontrado la muestra. En la figura 2 se muestra la forma en que esto sucede.

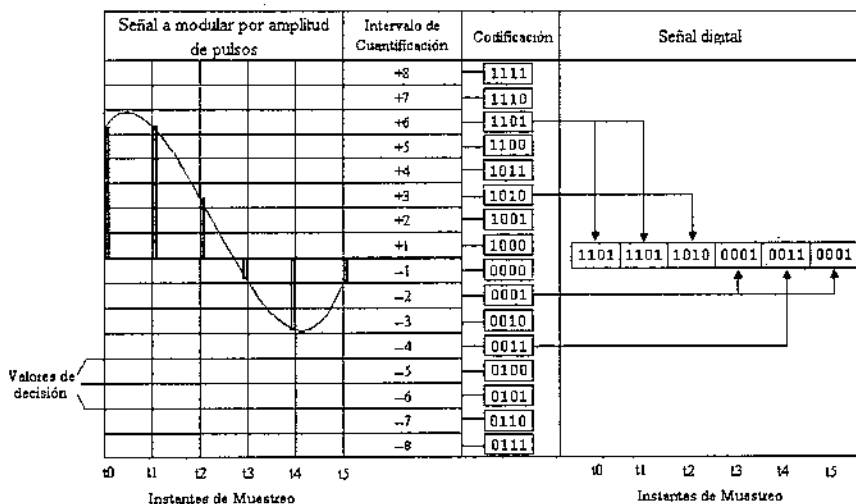


Figura 2

Para este caso en la figura anterior se usaron con el fin de una mejor comprensión 16 niveles o intervalos de cuantificación, y para representar en forma de código los 16 intervalos solo es necesario utilizar 4 bits. Tomando de cada muestra el intervalo al que pertenece y dando también a cada muestra el valor codificado de su intervalo, formamos en forma secuencial la señal digital de nuestra primitiva señal analógica.

En este caso se utilizan 4 bits para la codificación de las muestras y el nivel de ruido en la señal será inaceptable. Las muestras codificadas, también llamadas palabras, aumentarán su longitud si aumentamos el número de bits, que como vimos nos servirá para evitar el ruido superpuesto a la señal. Como vimos antes podemos usar estándares de profundidad de bits, como 8, 16 e incluso 20, 24 y 32 bits, que son estándares para la grabación profesional.

De ahí la importancia de el espacio de almacenamiento para las señales digitales de audio, ya que, haciendo un resumen, y tomando como base una grabación con calidad de CD (44100 Hz), estereofónica (2 canales, izquierdo y derecho) y con una profundidad de 16 bits, necesitaremos 44100 muestras por canal (88200 muestras por segundo), y 16 bits por muestra; para cada segundo de grabación se necesitarán 1 411 200 bits, y hablando esto en bytes, lo que es más común, dividimos esto entre 8 y nos queda 176 400 bytes. Aproximadamente necesitamos 172 KB de espacio en disco por segundo de grabación, lo que para una grabación musical, no es mucho; digamos que vamos a grabar una canción de 4

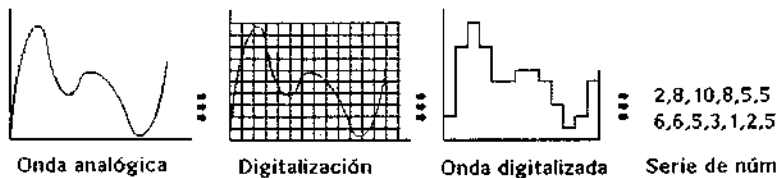
minutos (4 por 60 segundos = 240 segundos) para esos 4 minutos necesitamos 42 336 000 bytes, aprox. 40.3 MB para cuatro minutos. Si deseamos utilizar un sistema de grabación multipista, debemos multiplicar esos 40 Mb también por las pistas que vayamos a usar.

Algo que es muy utilizado en la práctica, es la grabación monofónica con calidad de CD, de esta forma se utiliza la mitad de espacio en disco. En la producción de música moderna a menudo las informaciones de espacio o estereofónicas (izquierda, derecha) se insertan artificialmente durante la mezcla.²⁰

2.2.2 Reproducción

Pero al hablar de audio digital no hay que olvidar que no sirve de nada tener el sonido digitalizado en el ordenador si no podemos escucharlo. Para ello, necesitamos hacer el proceso inverso al del muestreo: la conversión de digital a analógica, es encargada a los circuitos DAC, (Digital Analogic Converter). Además de convertir los números almacenados en el ordenador a una señal eléctrica, se debe filtrar ésta para obtener una señal válida. En la calidad de dichos filtros reside, en muchas ocasiones, la calidad de sonido de una tarjeta de muestreo, obteniendo en algunas un nivel de ruido de fondo que las hace inútiles para usuarios exigentes.

Conversión A/D



Conversión D/A



Figura 3: Diagramas de conversiones Analógico/Digital y Digital/Analógico

²⁰ Markus Van Well
La Música con el PC
Maracombo
Página 39

Como es de suponer, entre los procesos de digitalización y escucha, tenemos acceso a una variada gama de manipulaciones del sonido, que nos permiten obtener resultados imposibles, o, al menos, muy difíciles de realizar por otros métodos, sin necesidad de usar un caro equipo especializado.

A diferencia del MIDI, que sólo almacena información de interpretación, aquí grabamos el sonido real resultante, por lo que para su reproducción no se necesita la fuente de sonido original. Esto significa una ventaja, pero por otro lado, no se podrá asignar una determinada interpretación a otro instrumento diferente a aquel con el que se grabó, corregir notas individuales ni otras modificaciones similares, que son posibles de hacer en MIDI y que veremos más adelante.

2.2.3 Ventajas

El audio digitalizado es mucho más fácil de manipular y por lo tanto de trabajar con él y de una forma mucho más rápida y eficaz que si de audio análogo se tratará. Además de que es más barato y se pueden obtener resultados realmente buenos.

2.3 MIDI Introducción

El procedimiento técnico que constituye la base fundamental para que la música pueda transmitirse de un dispositivo a otro sin alterar el material audible es la digitalización. Esta técnica consiste en la transferencia de determinada información sonora a valores numéricos (dígitos), operación que permite la utilización del sonido en otras aplicaciones digitales.

En los años ochentas se consolidó el sistema de interface musical para instrumentos musicales, mejor conocido como MIDI (*Musical Instrument Digital Interface*), el cual permite traducir señales analógicas a digitales y viceversa. Ello ha permitido que puedan conectarse una gran variedad de instrumentos electrónicos musicales con dispositivos de audio digitales, como también con recursos informáticos, principalmente las computadoras, estableciendo un mayor control en las tareas de sonorización, grabación, edición y transmisión de sonido. El sistema MIDI es un recurso de gran utilidad en el procesamiento del audio musical ya que permite aplicar una extensa variedad de modificaciones al sonido durante la ejecución de algún instrumento musical electrónico o en la elaboración de una grabación sonora.

“El midi es un estandar de comunicación adoptado por todos los fabricantes de instrumentos musicales, computadoras y aparatos de audio/video en general.”²¹

Los orígenes del MIDI se sitúan a principios de los años setenta cuando Robert A. Moog lanzó al mercado un instrumento electrónico para hacer música al que se bautizó como sintetizador. Este dispositivo consistía en una unidad que generaba sonidos controlados por impulsos eléctricos, los cuales disparaban el sonido a voltajes variables con los que se controlaba la tonalidad. Esta máquina aún trabajaba con señales análogas y con la tecnología electrónica de bulbos.

Este sistema fue uno de los más importantes desarrollos en los primeros sintetizadores. Mediante el control por tensión las características de los dispositivos de un aparato pueden ser establecidas mediante una señal aplicada desde el exterior o interiormente. Esta señal de control es una tensión variable, incluso puede ser una señal de audio.

²¹ Oros Cabello, Juan Carlos
MIDI y MOD Fácil con el PC
Ra - ma 1996

Debido a la evolución de los sistemas digitales, los sintetizadores prácticamente se convirtieron en pequeñas computadoras, así que se consideró la idea de utilizar un sistema de comunicación basado en la técnica que se utiliza para enlazar sistemas de cómputo. Para evitar las incompatibilidades, los fabricantes de instrumentos musicales electrónicos se reunieron y acordaron la definición de las especificaciones para la comunicación entre instrumentos a través de la interfase MIDI.

MIDI, que en español se traduce como Interfase digital de instrumentos musicales (Musical Instrument Digital Interface). Es el protocolo estándar para el intercambio de información musical entre instrumentos musicales, sintetizadores y computadoras. Define los códigos para un evento musical, lo que incluye el comienzo de una nota, su tono, duración, volumen y atributos musicales. También define códigos para varios ajustes de botones, diales y pedales usados en sintetizadores. MIDI se utiliza comúnmente para sincronizar notas producidas en varios sintetizadores. Una computadora con interfase MIDI puede usarse para grabar una sesión musical, pero en lugar de grabar las ondas de sonido analógicas como en una grabadora, la computadora almacena la música como códigos de teclas y de control. El objetivo original de MIDI fue permitir que un sintetizador ejecutara notas generadas por otro sintetizador. La idea básica de este sistema consiste en hacer sonar más de un aparato a la vez, creando así un instrumento polifónico por el sistema de adición de varios componentes.

El protocolo de comunicación MIDI existe desde el año 1982 y "hoy en día apenas hay instrumentos musicales que puedan prescindir de él"²²

Un malentendido muy frecuente es el de creer que el MIDI transporta sonido en sí, lo cual es completamente falso, lo que viaja por la interfaz MIDI son datos, y el sonido se crea en el periférico al que llegan dichos datos (por ejemplo una tarjeta de sonido o un sintetizador). "Si un periférico recibe los datos MIDI por ejemplo - toca durante un segundo la nota Do3 a máximo volumen-, esta información no dice nada sobre el tipo de sonido en sí. Es decir el usuario decide libremente si va a utilizar el sonido de un saxofón, de un instrumento de percusión o los gritos de un niño."²³

²² Markus Van Well
La Música con el PC
Maracombo

Los instrumentos MIDI tienen exteriormente unos puertos o enchufes para conectarlos con otros instrumentos mediante cables y se recomienda que no excedan de 15 metros de longitud que estén blindados y sean cables de calidad para evitar interferencias o pérdidas de información. Los conectores que se utilizan en los cables son tipo DIN y se conectan en tres tipos de puertos que son MIDI IN, OUT, y THRU. Por el puerto MIDI IN (entrada) el equipo recibe la información enviada desde otros aparatos, por el OUT (salida) transmite su propia información a otros equipos y por el THRU (a través) vuelve a enviar una copia de lo que recibe por el IN, y puede así pasar la información a otro aparato.

Como ya se mencionó por el cable MIDI no va audio digital ni analógico, tan solo datos, estos datos son mensajes codificados en números binarios que simbolizan acciones musicales. Dichos mensajes son interpretados o generados por los microprocesadores de los instrumentos electrónicos relacionándolos con alguna acción musical. La comunicación es serial, es decir se transmite un bit a la vez, a la velocidad de 31 250 baudios (bits/seg).

Una parte muy importante de los aparatos que pueden trabajar con MIDI es la "tabla o tarjeta de implementación MIDI" en donde se exponen los mensajes que puede transmitir y recibir, los mensajes MIDI que un instrumento no pueda recibir, le podrán ser transmitidos pero él se comportará como "sordo" ante ellos.

Para la transmisión en el sistema MIDI es necesario tener orden en los datos o información que se envía y se recibe para poder ser procesada correctamente. La forma de hacer esto es usando mensajes MIDI. Los mensajes MIDI pueden ser de dos tipos: de canal y de sistema. Para cada uno de los dos tipos tenemos otras subdivisiones.

Un mensaje MIDI puede estar formado por 1, 2 o 3 bytes; en ellos podemos encontrar un byte, al que llamaremos *byte de estado o código de mensaje*, y a los restantes, *byte de datos 1 y 2* respectivamente.

El byte de estado o código de mensaje es el encargado de facilitar la clave de lectura al instrumento receptor para indicarle que hacer con los siguientes bytes de datos.

²³ Markus Van Well
La Música con el PC
Maracombo
pagina 58

Para diferenciar aún mejor al byte de código de mensaje de los de bytes de datos, los primeros poseen un número comprendido entre 128 y 255, mientras que los números comprendidos entre 0 y 127 corresponden a los bytes de datos.

Los mensajes están formados por una serie de bytes en código binario. El primero de ellos contiene la instrucción (byte código de mensaje), y los restantes, los datos relativos a dicha instrucción.

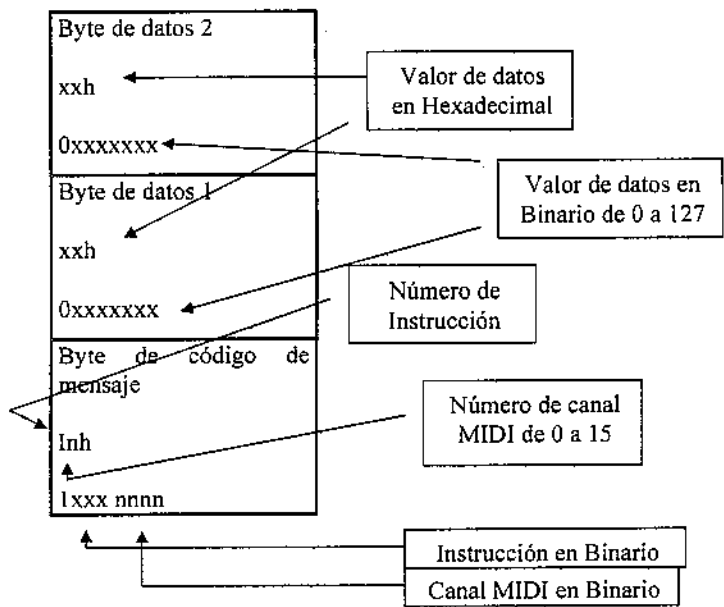


Figura 4:
Esquema de un mensaje
MIDI

2.3.1 Mensajes de canal

“Un primer paso sumamente importante para explotar el midi es comprender razonablemente todos sus mensajes. Hay que admitir que probablemente no los utilizaremos todos, pero no seremos capaces de distinguir los que nos van a ser útiles a menos que conozcamos todas las posibilidades”²⁴

Un canal MIDI es la vía por la que se pueden comunicar aparatos MIDI, y en el sistema MIDI se pueden tener hasta 16 canales y todos ellos viajan a través de un solo cable. La utilidad de esto es que se puede tener un solo aparato o dispositivo maestro que controle a muchos aparatos vía MIDI (por ejemplo sintetizadores, procesadores de efectos, mesas de mezclas, etc.). La aplicación más común de los canales MIDI es que desde un dispositivo maestro (una computadora por ejemplo), se pueda asignar cada parte o voz de la música a un instrumento distinto. Este dispositivo maestro se comporta como un director de orquesta que tiene que decir a cada músico cuándo y cómo tocar. Los canales MIDI son como los canales de televisión, y cada instrumento MIDI debe “sintonizarse” al mismo canal al que se le esta enviando su parte. Por ejemplo si las tres partes de una composición son enviadas por los canales 3, 4 y 5, un instrumento sintonizado al canal 3 solo hará caso y tocará lo que reciba por éste canal, haciendo caso omiso al resto. *Los mensajes de canal por lo tanto se envían siempre por un canal determinado.* Y de este tipo de mensajes tenemos los siguientes: de voz, y de modo.

2.3.1.1 Mensajes de voz

Los mensajes de voz se refieren a la interpretación de la música y muchos de ellos se corresponden con acciones sobre un teclado o sintetizador.

El mensaje “Note On” sirve para tocar una nota; en él se indican dos informaciones: la nota y la velocidad. La nota se expresa mediante un número entre 0 y 127, que normalmente corresponden a todos los semitonos desde el Do -2 hasta el Sol 8, siendo el 60 el Do 3 central del piano. El otro número (entre 0 y 127) indica con que velocidad se baja la tecla; normalmente se asigna ésta al volumen o intensidad del sonido, pero

²⁴ Pentfold R.A.
MIDI Avanzado Guía de usuario
Ra - ma 1993

según el sintetizador, también se suele poder asignar a otros parámetros como modulación, tiempo de ataque, brillantez tímbrica, etc. Como la transmisión es serial, en MIDI un acorde es en realidad un arpeggio, pero se perciben sus notas simultáneamente ya que la velocidad de transmisión equivale a más de 1000 mensajes *note on* por segundo. El código de mensaje es 9nh, donde n es el número de canal MIDI.

Byte de código de mensaje	Byte de datos 1	Byte de datos 2
9nh	Número de nota	Velocidad de pulsación
1001 nnnn	0xxxxxxx	0wwwwwww

“Note Off” es idéntico al anterior pero sirve para cañar una nota. Se indica el número de la nota y la velocidad de “levantamiento” de la tecla; pudiéndose asignar ésta también a algún parámetro. La duración de una nota viene definida, pues, por el retardo entre un mensaje *note on* y el *note off* correspondiente a la misma nota. Para este caso el código de mensaje es 8nh, donde n es el número del canal MIDI.

Byte de código de mensaje	Byte de datos 1	Byte de datos 2
8nh	Número de nota	Velocidad de levantamiento
1000 nnnn	0xxxxxxx	0wwwwwww

La “Pressure” (presión) o “aftertouch” ejercida sobre éste teclado mientras está bajada la tecla, también se puede transmitir. Hay dos variantes: la polifónica (código de mensaje: Anh), que distingue la presión sobre cada tecla y la común (*common* o de canal; código de mensaje: Dnh) que reconoce la presión media sobre todo el teclado. Es un mensaje continuo, es decir se envía cada poco tiempo mientras la nota esta activada, lo cual puede sobrecargar la transmisión causando retrasos en otras notas o que el receptor se bloquee porque le llega más información de la que puede manejar. Para la variante polifónica el mensaje consta de tres bytes el

primero contiene el código de mensaje, el segundo el número de la nota y el tercero la presión ejercida sobre esta, puede tomar valores entre 0 y 127 donde para 0 indica que no se ejerció presión alguna y para el 127 indica la máxima presión que se puede ejercer.

Byte de código de mensaje	Byte de datos 1	Byte de datos 2
Anh	Número de nota	Postpulsación
1010 nnnn	0xxxxxxx	0wwwwwww

En la variante común o *common* el mensaje está formado por dos bytes, el primero de ellos contiene el código del mensaje, y el segundo contiene la información sobre la cantidad de presión media que se aplicó después de que la tecla ha sido oprimida. Este byte puede tomar valores de 0 a 127 igual que el anterior.

Byte de código de mensaje	Byte de datos 1
Dnh	Postpulsación
1010 nnnn	0wwwwwww

El "Pitch bend" corresponde a la rueda del mismo nombre de los sintetizadores que sirve para variar la altura de forma continua. En realidad no es continua sino que el intervalo total de variación se divide en escalones, (0 a 16383). Este mensaje está sujeto a los mismos problemas que el anterior en cuanto a saturación de la transmisión. Este mensaje está formado por tres bytes; el primero contiene el código de mensaje (Enh), el segundo y tercer bytes contienen en conjunto la cantidad de variación de tono que se llevo a cabo. Para definir la cantidad se utiliza un número único de 14 bits que definen el intervalo de escalones antes mencionado.

Byte de código de mensaje	Byte de datos 1	Byte de datos 2
Enh	Posición controlador MSB	Posición controlador LSB
1110 nnnn	0mmmmmmm	0sssssss

El "Program change" (cambio de programa) envía un número (0-127) que sirve para seleccionar a distancia un timbre determinado del sintetizador o para cambiar el programa en una unidad de efectos, mesa de mezclas, etc. Por lo tanto, poniendo estos mensajes no hace falta ir a apretar el botón del aparato correspondiente cada vez que se necesita un cambio tímbrico. En muchos casos no es muy obvia la relación entre el número enviado y el programa que selecciona el aparato, sobre todo si los bancos de la memoria se numeran como A1, A2, A3,.....A12, B1, B2, etc. o si tienen menos de 128. Los aparatos controlables vía MIDI tienen información precisa sobre los códigos o números que son necesarios para controlarlos. Este mensaje está formado por dos bytes, el primero es el código de mensaje (Cnh) donde n es el número de canal MIDI. A continuación iría el byte de datos, que contendría la información del número de programa al que se desea cambiar.

Byte de código de mensaje	Byte de datos 1
Cnh	Número de programa
1100 nnnn	0ppppppp

El "Control change" (cambio de control) es parecido al anterior. Sirve para variar "desde lejos" la posición de un controlador o mando del aparato receptor. Se envía un primer número de identificación del controlador (de 0-127) y un segundo número que indica que valor toma el controlador. Hay dos tipos de controladores, los continuos (como la rueda de modulación, pedal de expresión, etc.) en que éste número podrá tomar cualquier valor entero de 0 a 127, y los tipo interruptor (switch) que toman solo 0 o 127 (off-on o no-si). Nuevamente los aparatos con características "controlables" tienen explicaciones de sus parámetros de control y la forma de controlarlos vía MIDI. Este mensaje esta formado por tres bytes, el primero es el código de mensaje (Bnh) donde n es el número de canal MIDI. A continuación va el byte de datos, que contendrá información del número de controlador, y seguidamente, el segundo byte de datos que contendrá la cantidad de modulación o movimiento de dicho controlador.

Byte de código de mensaje	Byte de datos 1	Byte de datos 2
Bnh	Número de controlador	Modulación movimiento
1011 nnnn	0ccccccc	0wwwwwww

Cada controlador tiene asignado un número identificativo. Estos números son más o menos pactados por los fabricantes, por lo que pueden existir algunas diferencias entre controladores de distintos fabricantes.

Para evitar problemas actualmente casi todos los instrumentos permiten que a cada controlador se le pueda asignar cualquier número, de esta manera se logra una mayor flexibilidad y se consigue, por ejemplo, que al girar la rueda de modulación del teclado maestro varíe cualquier otra función en el esclavo, por ejemplo el volumen, el vibrado, etc.

2.3.1.2 Mensajes de modo

Sirven para indicar cómo debe utilizar el instrumento sus voces internas y los canales MIDI, y se codifican como mensajes de cambio de control (código de mensaje Bnh) especiales.

El "local control off" significa que el teclado no controla la generación de sonido del propio sintetizador aunque sí puede tocar otros exteriores vía MIDI. De este modo, puede, por ejemplo, utilizarse un teclado portátil con ritmos, sonidos, etc. para que al pulsar sobre sus teclas no suene nada y únicamente transmita información MIDI a otro dispositivo exterior, que será el que sonará.

Byte de código de mensaje	Byte de datos 1	Byte de datos 2
Cambio de controlador	Controlador Local	Local activado
Bnh	7Ah	80h
1011 nnnn	01111010	10000000
Cambio de controlador	Controlador Local	Local desactivado
Bnh	7Ah	00h
1011 nnnn	01111010	00000000

“All notes off” se suele usar para “callar” un instrumento en caso de problemas. Su forma es la siguiente.

Byte de código de mensaje	Byte de datos 1	Byte de datos 2
Cambio de controlador	Desactivación total de voces	Byte transmitido pero ignorado
Bnh	7Bh	00h
1011 nnnn	01111011	00000000

Los siguientes mensajes son para establecer los modos MIDI. Si un instrumento se ajusta a “**omni off**” significa que reaccionará solo a lo que reciba por un canal determinado; en “**omni on**” reaccionará a todo lo que reciba, sea cual fuere el canal. En “**Mono on**” significa monofónico, es decir, por ese canal solo tocará una nota cada vez. En “**Poly on**” (o “mono off”) se comportará como polifónico, es decir, podrá tocar varias notas simultáneas. “mono off” hace mucho tiempo que ya no es muy utilizado aunque en algunos casos puede ser útil. Los cuatro modos MIDI vienen en las combinaciones de estos conceptos. Para activar cualquier modo se necesitan dos mensajes MIDI, uno contendrá la instrucción sobre como se reaccionara a los mensajes por canal (OMNI ON/OFF) y otro que tendrá la instrucción de su comportamiento ante notas simultaneas (MONO/POLY).

En el modo 1, OMNI ON/POLY, todo lo que se recibe se toca, por cualquier canal y con cualquier número de notas simultaneas.

Modo 1 : OMNI ON/ POLY	
Byte de código de mensaje: Cambio de controlador	Byte de código de mensaje: Cambio de controlador
Bnh	Bnh
1011 nnnn	1011 nnnn
Byte de datos 1 : OMNI ON	Byte de datos 1 : POLY
7Dh	7Fh
01111100	01111111
Byte de datos 2 : byte transmitido pero ignorado	Byte de datos 2 : byte transmitido pero ignorado
00h	00h
00000000	00000000

En el modo 2, OMNI ON/MONO, tocará todo lo que recibe por cualquier canal, pero solo una nota cada vez. En caso de que reciba más de una nota cada vez, el criterio de cómo se elige la nota a tocar, depende del sintetizador de sonido: la más aguda, la más grave, la primera que llega, etc. Este modo es muy poco usado.

Modo 2 : OMNI ON/ MONO	
Byte de código de mensaje: Cambio de controlador	Byte de código de mensaje: Cambio de controlador
Bnh	Bnh
1011 nnnn	1011 nnnn
Byte de datos 1 : OMNI ON	Byte de datos 1 : MONO
7Dh	7Eh
01111100	01111110
Byte de datos 2 : byte transmitido pero ignorado	Byte de datos 2 : byte transmitido pero ignorado
00h	00h
00000000	00000000

El modo 3, OMNI OFF/POLY, es el más usado con secuenciadores porque cada instrumento puede tocar polifónicamente y solo en su canal. Por ejemplo, un secuenciador puede enviar por el canal 1 una melodía para un sampler con sonido de flauta; en el 2 un acompañamiento con acordes a un sintetizador y en el 3 la melodía de bajo a otro sintetizador.

Modo 3 : OMNI OFF/ POLY	
Byte de código de mensaje: Cambio de controlador	Byte de código de mensaje: Cambio de controlador
Bnh	Bnh
1011 nnnn	1011 nnnn
Byte de datos 1 : OMNI OFF	Byte de datos 1 : POLY
7Ch	7Fh
01111101	01111111
Byte de datos 2 : byte transmitido pero ignorado	Byte de datos 2 : byte transmitido pero ignorado
00h	00h
00000000	00000000

El modo 4 OMNI OFF/MONO, puede ser útil para que un sintetizador multitímbrico reciba varias melodías monofónicas, cada una por distinto canal, asignándose cada uno a un timbre diferente.

Modo 4 : OMNI OFF/ MONO	
Byte de código de mensaje: Cambio de controlador	Byte de código de mensaje: Cambio de controlador
Bnh	Bnh
1011 nnnn	1011 nnnn
Byte de datos 1 : OMNI OFF	Byte de datos 1 : MONO
7Ch	7Eh
01111101	01111110
Byte de datos 2 : byte transmitido pero ignorado	Byte de datos 2 : byte transmitido pero ignorado
00h	00h
00000000	00000000

Este tipo de instrumentos multitímbricos son multimode, es decir pueden usarse como si fueran varios instrumentos virtuales en uno, y definir el número de notas simultáneas en cada canal. El ejemplo que se menciono en el modo 3 se puede hacer con un solo sintetizador.

2.3.2 Mensajes de sistema

Son mensajes para todo el sistema MIDI por lo que no llevan número de canal. Estos mensajes se utilizan para manejar por control remoto desde el maestro de los instrumentos MIDI. Hay tres tipos: comunes, de tiempo real y exclusivos de sistema.

2.3.2.1 Mensajes de sistema común o comunes de sistema

Los mensajes de sistema común son un pequeño grupo de mensajes que se utiliza para llevar a cabo funciones MIDI, como, por ejemplo, controlar secuenciadores, computadoras y cajas de ritmo. Estos son los mensajes

Marcador de posición de secuencia (canción) (Song position pointer)

Permite iniciar la reproducción de una canción MIDI desde un compás determinado. Todos los instrumentos interconectados comenzarán a sonar desde el compás seleccionado. Código de mensaje F2h

Tomando como referencia la cantidad de semicorcheas que han pasado desde el principio de la composición; podemos situarnos en un lugar determinado de la canción.

Este mensaje es utilizado conjuntamente con los mensajes de sistema de tiempo real.

Con este mensaje no es necesario reproducir desde el principio una composición, si lo que desea es reproducir un fragmento de ella.

Byte de código de mensaje	Byte de datos 1	Byte de datos 2
F2h	Byte indicador 1	Byte indicador 2
1111 0010	0bbbbbbb	0LLLLLLL

Selección de canción (Song select)

Éste mensaje es similar al de cambio de programa con la diferencia de que a este mensaje no es necesario asignarle un número de canal. Es decir, cambia a todos los instrumentos el programa para que queden ajustados y en disposición para reproducir una canción determinada.

Éste mensaje esta formado por dos bytes; el primer byte es el código de mensaje (F3h), a continuación el byte que contiene el número de la canción.

Byte de código de mensaje	Byte de datos 1
F3h	Número de canción
1111 0011	0ccccccc

Afinación (Tune request)

Este mensaje provoca la afinación interior de todos los instrumentos a la vez con su referencia interna. Esta en desuso en los nuevos teclados. Este mensaje esta formado por un solo byte, el código de mensaje es F6h

Byte de código de mensaje
F6h
1111 0110

Fin de sistema exclusivo (End of system exclusive)

Este mensaje es enviado por el controlador maestro para hacer saber al dispositivo esclavo que la transmisión del mensaje de sistema exclusivo ha finalizado.

Cuarto de cuadro (Quarter Frame)

Este mensaje es parte del MTC (MIDI Time Code) o, lo que es lo mismo, código MIDI de tiempo.

2.3.2.2 Mensajes de sistema de tiempo real

Este tipo de mensajes se utilizan para sincronizar los diferentes instrumentos electrónicos. Estos mensajes están compuestos por un solo byte, que correspondería al byte de código de mensaje (primer byte)

Reloj (Clock)

Gracias a este sistema se puede sincronizar todo el sistema MIDI para tocar al mismo tempo o velocidad de ejecución. Este mensaje marca el ritmo, equivalente a pulsos idénticos, a un ritmo constante de 24 cada negra. El código del mensaje es F8h, esta formado por un solo byte.

Byte de código de mensaje
F8h
1111 1000

Mensaje de inicio (Start)

Este mensaje indica a los instrumentos del sistema que comiencen a tocar desde el principio la composición contenida en la memoria. También esta formado por un solo byte su código es FAh

Byte de código de mensaje
FAh
1111 1010

Continuar (Continue)

Este mensaje se utiliza para continuar el fragmento musical en el mismo punto en que fue detenido. Su código: FBh

Byte de código de mensaje
FBh
1111 1011

Mensaje de final (Stop)

Este mensaje, como es obvio detiene la canción en el punto deseado. Su código de mensaje es FCh.

Byte de código de mensaje
FCh
1111 1100

Sensor activo (Active sensing)

Este mensaje se envía cada 0.3 segundos desde el controlador maestro al esclavo, y averigua si las conexiones MIDI están intactas. En caso contrario, cerrará todas las compuertas de transmisión y apagará todos los sonidos que estuvieran activados, señalando un error MIDI. El código de mensaje es FEh.

Byte de código de mensaje
FEh
1111 1110

Reajuste de sistema (System reset)

La finalidad de este mensaje es restablecer los parámetros de los dispositivos esclavos MIDI a sus valores de origen o a los disponibles por defecto. El código de mensaje es FFh.

Byte de código de mensaje
FFh
1111 1111

2.3.2.3 Mensajes de sistema exclusivo (System exclusive messages)

Estos mensajes se utilizan para enviar mensajes entre dispositivos de la misma marca.

Se trata, pues, de mensajes específicos que están pensados para ser procesados solo por determinados dispositivos MIDI. Se pueden utilizar estos mensajes para intercambiar sonidos entre sintetizadores similares o almacenar sonidos en disquetes.

Son mensajes circunscritos al lenguaje interno de cada aparato, utilizándose para programar los parámetros de síntesis, control y funcionamiento específicos de cada instrumento.

La composición de estos mensajes es, como en casi todos los anteriormente vistos un primer byte con el código de mensaje, a continuación un byte que define el código del fabricante y finalmente uno o dos bytes más para indicar datos adicionales.

Byte de código de mensaje	Byte de datos 1	Byte de datos 2
Sistema Exclusivo	Byte de datos 1 ID Fabricante	Byte de datos 2 Datos adicionales
F0h	xxh	
1111 0000	0xxxxxxx	

Descripción de un mensaje de inicio de sistema exclusivo. A partir de aquí, irán tantos bytes de datos adicionales como sean necesarios hasta configurar la totalidad del mensaje exclusivo, siendo el último byte el de fin de sistema exclusivo.

Todos estos mensajes terminan siempre con un mensaje de final de transmisión.

Fin del sistema exclusivo (End of system exclusive)

Este mensaje es enviado por el controlador maestro para hacer saber al dispositivo esclavo que la transmisión del mensaje ha finalizado. El código de éste mensaje es F7h, y consta de un solo byte.

Byte de código de mensaje
Fin del Sistema Exclusivo
F7h
1111 0111

2.3.3 Utilización

El protocolo de comunicación MIDI es útil como se puede ver para la interconexión de dispositivos que lo entiendan y por este medio producir sonido, o controlar otros dispositivos como controladores de luces, de efectos, mezcladoras, etc. Hasta este punto eso solo es una conexión y lo que hace falta es el o los intérpretes y el compositor.

Con MIDI es fácil hacer presentaciones en vivo con secuencias pregrabadas y con instrumentos secuenciadores conectados a la computadora o con las secuencias grabadas en ellos precisamente. También es una herramienta muy útil en el estudio de grabación para tener la base de la secuencia de notas que un músico debe tocar y comparar si la secuencia

y la grabación son iguales, incluso el músico puede seguir su secuencia y tocar simultáneamente, así serán iguales, o puede seguir la secuencia de otro o de los otros instrumentos, por ejemplo un guitarrista puede seguir la secuencia de la batería, el bajo, el piano, etc. todo esto para seguir pistas de precisión y tocar a tempo tan bien como se haría con un metrónomo pero con más facilidad.

También es útil para escribir grabaciones en MIDI para presentaciones en vivo, para pistas en un estudio, para un juego, para una aplicación de computadora, una página de internet, etc. existen muchas facilidades y se tiene el control absoluto de la composición como ya se vio. Adelante se mostrarán algunos ejemplos de software útil tanto para grabaciones de audio digital y para grabaciones en MIDI.

La imagen 1 muestra una pantalla del programa Sound Forge de la empresa Sonic Foundry. Este programa sirve para hacer grabaciones digitales y tratarlas como mejor convenga. Este programa como casi todos los programas que involucran grabación de audio digital contiene funciones del protocolo MIDI, en este programa no se puede componer ni escribir en secuencias MIDI, pero las funciones MIDI pueden ser útiles para controlar aparatos externos siguiendo una secuencia, por ejemplo, un procesador de efectos puede cambiar de efecto, de banco o de parámetros de efecto mientras el programa reproduce una grabación de otro sonido o instrumento. En la imagen tenemos la captura de una señal grabada, esta es una de las funciones que incorporan todos los programas de edición de audio para mayor facilidad cuando se edita una señal, pues todos los cambios además de oírse, también se ven.

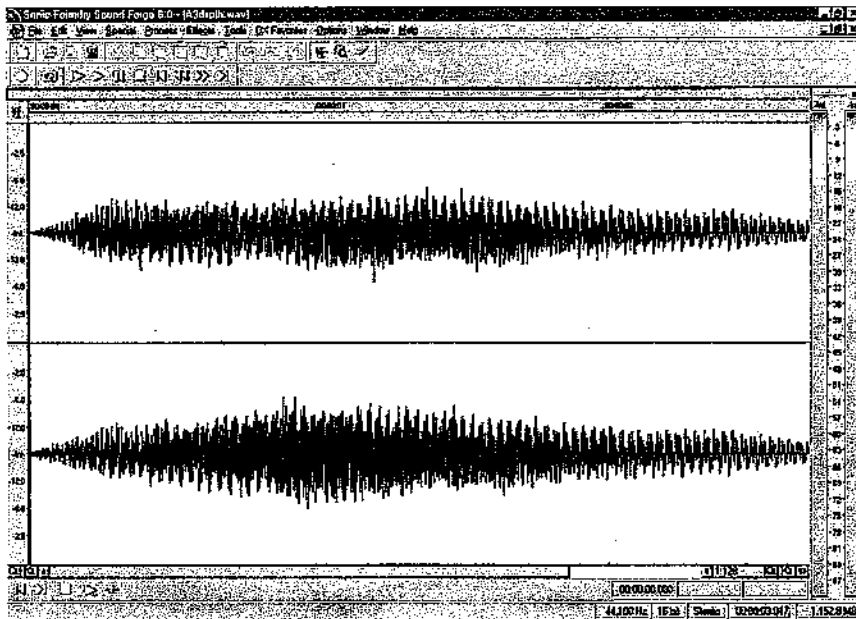


Imagen 1: Captura de pantalla del programa Sound Forge de Sonic Foundry, en esta pantalla puede verse la "forma" de una señal de audio.

Una de las maneras de procesar las señales es desde antes de grabarlas; ya grabadas estas señales se pueden, como en un texto cortar, copiar, pegar, etc. y se puede elegir lo que quiero escuchar de una señal y lo que no. Además de estas operaciones puedo agregar efectos a las señales después de que han sido grabadas. La siguiente imagen (Imagen 2) es una pantalla también del programa Sound Forge donde se encuentran estos efectos.

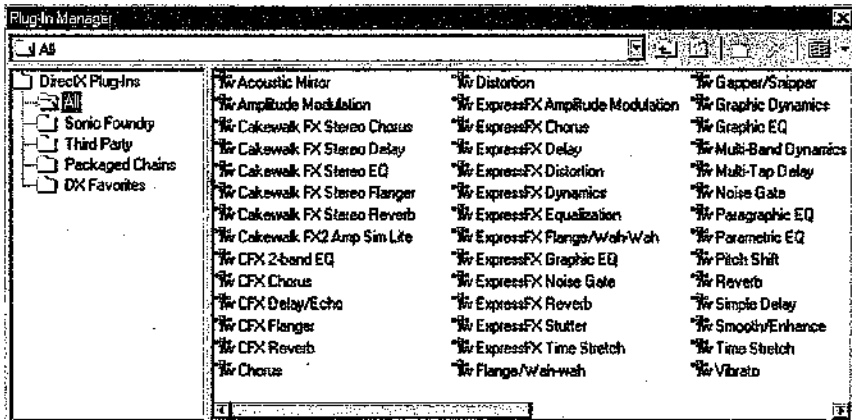


Imagen 2: Captura de pantalla del programa Sound Forge de Sonic Foundry que muestra los efectos disponibles que se le pueden aplicar a las señales de audio

En las imágenes 3 y 4 se muestran dos pantallas del programa Cakewalk Pro Audio, este programa es como el anterior un programa para edición de audio, pero también puede manejar funciones MIDI más completas, se puede editar, escribir, transmitir, recibir, reproducir, etc. datos MIDI y simultáneamente reproducir audio digital, ambas cosas en varios canales para cada una lo que da una gran flexibilidad para trabajar con él. La imagen 3 muestra la captura de varios tracks de audio digital (verde) y varios de datos MIDI (amarillo), ambos se pueden editar agregando efectos por ejemplo. Y en la imagen 4 se muestra la captura de la edición de datos MIDI en notación musical, se pueden mostrar también estos datos en otras notaciones como el roll de piano y la lista de eventos. En estos programas Sonic Forge y Cakewalk Pro Audio como en otros muchos más también se añaden funciones para la inserción de video y el tratamiento de su banda sonora.

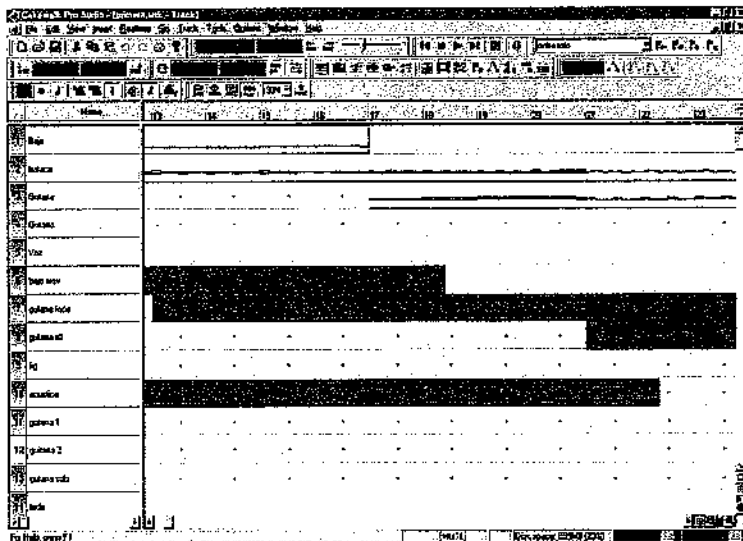


Imagen 3: Captura de pantalla del programa Cakewalk Pro Audio, en esta imagen pueden verse varios "tracks" de audio digital y de MIDI, en ambos se pueden aplicar las modificaciones que se crean pertinentes.

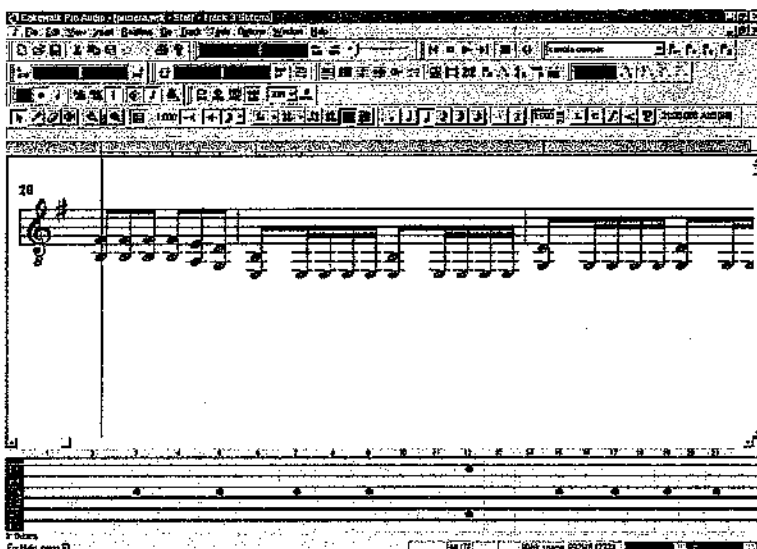


Imagen 1: Captura de pantalla del programa Cakewalk Pro Audio, en esta imagen se puede ver uno de los "tracks" MIDI de la imagen 3 en notación musical, y de esta forma se puede modificar como se crea necesario

2.4 Conclusión

En este capítulo vimos la relación de el sonido con la computadora, la manera en que la computadora nos sirve de herramienta para la creación de música. Vimos como se procesa el audio para convertirlo en una señal digital y vimos que los requerimientos de una computadora para trabajarlo no son pocos. Este conocimiento junto al conocimiento del capítulo 1, nos va a ser muy útil en capítulo siguiente. Ya que en el siguiente se ve el proceso de la creación de música en la computadora, pero por ella misma, en éste la información de cómo se utiliza el sonido no es explícita, pero se de la manera de crearlo.

Con la información de este capítulo además, el conocimiento del estándar MIDI servirá para todo el interesado para muy diversos fines, algunos de los cuales se mencionaron, otros que pueden surgir para casos concretos del compositor. Entre las ocupaciones que se le puede dar a éste conocimiento está el control automático de procesos por medio de sonido o por medio de datos MIDI, por ejemplo.

Capítulo 3 Composición mediante la computadora, Música Automática

3.1 Introducción

En la música hay una componente importante de abstracción y formalización, y muchos procesos de composición se pueden expresar como una serie de operaciones matemáticas y lógicas que son traducibles a programas de computadora. Es un hecho que desde la construcción de las primeras computadoras, se ha experimentado incesantemente en como utilizarlas ventajosamente para la composición, obteniendo desde entonces frutos que van desde lo anecdótico hasta auténticas obras de arte. La investigación y la creación en este terreno están sirviendo también para conocer mejor nuestros procesos mentales musicales.

Los secuenciadores y los editores de partituras son herramientas que ayudan bastante al compositor, liberándolo de muchos trabajos mecánicos y estimulando su creatividad de una manera nueva. Pero en el fondo estos programas no van más allá de lo que puede ayudar un procesador de textos a un escritor; por lo general, "la computadora jamás toma decisiones propias", debiendo especificar el compositor hasta el más mínimo detalle. Hay programas y sistemas, que veremos, sirven para que el compositor declare sus métodos de composición y delegar a la computadora la confección de los detalles o incluso de toda la pieza. Por supuesto, estos métodos son validos para cualquier tipo de música tanto para la interpretada por músicos como la ejecutada por la propia computadora. Para el primer caso la música se obtendrá por la computadora en forma impresa; en partituras, en la segunda por señales generadas por la computadora para los sintetizadores que las procesarán, y señales de audio de grabaciones digitales en la computadora.

El hecho de utilizar la computadora de esta manera para componer es una decisión de tipo estético, ya que es necesario que el músico concrete exactamente su método de composición. Para esta tipo de composición existe el método en que el compositor programa la computadora con instrucciones precisas de la composición, y también el método en el que la computadora utiliza reglas de probabilidad y azar para componer. Una vez realizado esto el compositor puede experimentar escuchando los resultados que da el programa para distintos datos de entrada. Si los resultados no le satisfacen, tiene las opciones de modificar su método de composición hasta conseguirlo o, la menos ortodoxa, de "mejorar" manualmente los resultados. Es evidente que este tipo de experimentación formal hecha sin ayuda de la computadora sería infinitamente más lenta, e incluso imposible, ya que el compositor tendría dificultades para desembarazarse de sus hábitos que podrían contradecir sus intenciones.

Una cuestión importante sería: ¿es capaz una computadora, convenientemente programada, de componer música que pueda ser comparable en calidad e inspiración a la que producimos los humanos? Esta pregunta es tan antigua como la de si es posible construir una máquina capaz de pensar. Ambas preguntas chocan con el obstáculo de que no sabemos con exactitud que es componer y tampoco que es pensar, y también ignoramos si algún día lo sabremos. Teniendo estos métodos de composición como precedente, hasta los compositores más escépticos pueden encontrar útil tener una máquina con la que probar sus formalizaciones musicales, es decir, que les sirva para desarrollar solo la parte racional de su música; además, la otra parte, la "no racional" o la "no expresable mediante normas", llámese intuición, emoción, etc., puede ser a su vez estimulada por los resultados obtenidos mediante la computadora.

Hay tantas formas de usar la computadora en composición como formas de componer. En general, se trabaja en dos fases: en la primera, el compositor debe formalizar, es decir, definir racionalmente los procesos de composición; en la segunda, lo codifica en la computadora, bien escribiendo un programa en un lenguaje general de programación o en uno especial para música, o bien operando directamente sobre un programa previamente escrito. Lo interesante sería escribir un programa en el que fuera posible ajustar determinados parámetros globales que sean significativos para nuestra percepción, y generando así distintos tipos de música, del mismo modo que podemos cambiar, por ejemplo, el tiempo de ataque de un sonido en un sintetizador.

Simplificando, se trata de que la computadora decida, por ejemplo, que nota elegirá a continuación. Hay dos posibilidades, lo podría hacer al azar, es decir, mediante los llamados métodos aleatorios o podría hacerlo utilizando métodos deterministas, que no se valen del azar por lo que los resultados son predecibles. Muchos compositores utilizan una combinación de ambos métodos.

3.2 Métodos aleatorios

Un ejemplo del proceso aleatorio es tirar repetidamente un dado; si vamos anotando los resultados, obtendremos una serie de números, y si los hacemos corresponder con distintas notas musicales habremos obtenido una melodía aleatoria. También se podría utilizar un programa para generar

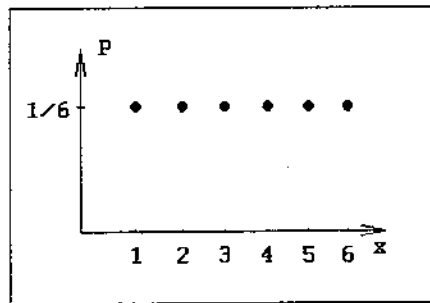
números aleatorios en la computadora que varíen entre valores determinados, y aplicarlos a distintos parámetros musicales (altura, ritmo, timbre, etc.). El trabajo del compositor consiste básicamente en, o bien utilizar distintos procesos aleatorios, o en filtrar los resultados, rechazando los que no cumplan una serie de reglas.

Los procesos aleatorios que se han empleado en la música son de dos tipos: aquellos en que cada suceso es independiente del resultado de otros sucesos (el lanzamiento repetido de un dado), o los que si son dependientes (el bingo sería uno de estos, ya que según avanza el juego la probabilidad de cada número, si no ha salido ya, va aumentando).

3.2.1 Métodos aleatorios: Sucesos independientes

Comenzando por los procesos de sucesos independientes, repasaremos un concepto de las matemáticas: la probabilidad de un suceso, es un valor que se obtiene dividiendo el número de casos favorables de que ocurra ese suceso entre los casos posibles. Así por ejemplo la probabilidad de que al lanzar un dado salga un número par es 0.5 es decir 3 (casos favorables $2, 4$ y 6) dividido entre 6 (casos posibles). La probabilidad mínima es cero (por ejemplo sacar un 33 al lanzar el dado, $0/6 = 0$) y la máxima 1 (sacar un número menor que 33 , $6/6 = 1$) también llamado evento seguro. Al conjunto de valores posibles que se puede obtener (del 1 al 6 en el dado) se le llama variable aleatoria. Las probabilidades de todos los resultados obtenidos al lanzar el dado se pueden representar en un gráfico llamado función de distribución, figura 1.

Figura 1



Función discreta de probabilidad correspondiente al lanzamiento de un dado. Eje vertical: probabilidad; horizontal: variable aleatoria. Todas las probabilidades valen $1/6$.

En el caso del dado, la variable aleatoria es discreta, es decir, tomo un número limitado de valores; para la música necesitamos también variables aleatorias continuas, ya que hay parámetros que toman un número infinito o muy grande de valores, por ejemplo la duración de una nota o el *pitch bend*. Si queremos generar éstos aleatoriamente necesitamos recurrir a funciones continuas de distribución de probabilidad. La más sencilla es la distribución uniforme (figura 2), que es la función *random* que proporciona números aleatorios entre 0 y 1, teniendo todos ellos la misma probabilidad. La figura 3 es un ejemplo musical de cómo se pueden asignar probabilidades a los distintos sucesos repartiendo proporcionalmente el segmento entre 0 y 1.

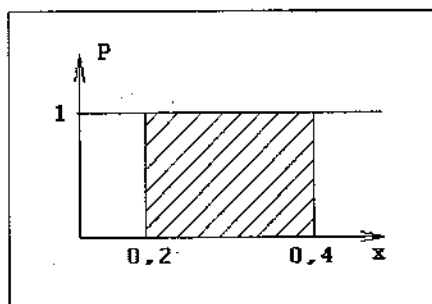


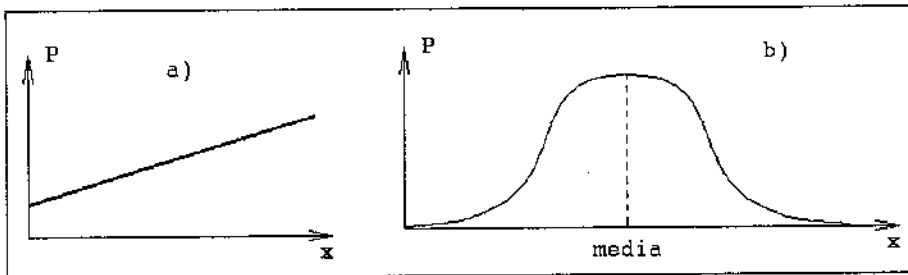
Figura 2: Función de distribución de probabilidad uniforme de la variable aleatoria continua x . un solo valor tiene probabilidad nula. La probabilidad de que x valga entre 0,2 y 0,4 es igual al área rayada = 0,2

```

Repetir 20 veces
  Begin
  Obtén un valor aleatorio y llámalo randoX
  Si  $0 \leq \text{randoX} < 0,5$  esta_nota es Do
  Si  $0,5 \leq \text{randoX} < 0,7$  esta_nota es Fa
  Si  $0,7 \leq \text{randoX} < 1$  esta_nota es Sol
  Guarda esta_nota
  End
  
```

Figura 3: Programa (escrito en pseudo-Pascal) para generar una melodía de 20 notas utilizando las notas do, fa, sol con probabilidades $P(\text{do})=0,5$ $P(\text{fa})=0,2$ y $P(\text{sol})=0,3$

Hay otras funciones de distribución; la función de distribución lineal y la función de distribución normal, en la primera por ejemplo la probabilidad puede ir en aumento, la normal se da en fenómenos como en la distribución de las estaturas de las personas, o en la distribución de errores al medir una cantidad. La máxima probabilidad corresponde a la media.



a) Función de distribución lineal

b) Función de distribución normal

Siguiendo un proceso parecido al de la figura del programa en pseudo-Pascal y utilizando un cambio de escala (figura 4). Podríamos generar alturas musicales comprendidas entre do3 y do5 utilizando dichas funciones de distribución (figura 5)

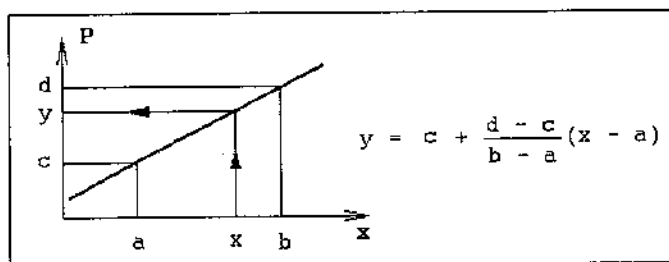


Figura 4: Cambio de escala ("mapeo"). Si un variable aleatoria "x" varía entre a y b, y queremos convertirla en otra "y" que varíe entre c y d, "y" se calcula utilizando la fórmula indicada. Por ejemplo si los valores aleatorios (x) que obtenemos de la computadora varían entre 0 y 1, y queremos convertirlos en notas MIDI (y que varíen entre 48 y 72 (Do2 y Do4), aplicaríamos dicha fórmula con los valores: a = 0, b = 1, c = 48, d = 72. es decir $y = 48 + 24 \cdot x$



Figura 5: Secuencias de alturas aleatorias entre do3 y do5 siguiendo distintas funciones de distribución de probabilidad. a) Distribución uniforme, b) distribución lineal (obsérvese la tendencia hacia el agudo) y c) distribución normal con media en do4 (obsérvese que casi todas las notas están en el registro central, que es el de mayor probabilidad)

También se podría aplicar al ritmo. Por ejemplo, se puede dar distinta probabilidad a cada una de las corcheas del compás de 4/4. Si se obliga a que cada compás tenga 4 ataques, irían surgiendo ritmos distintos de un compás a otro, pero con tendencia a repetirse más ciertas corcheas que otras. (Figura 6)

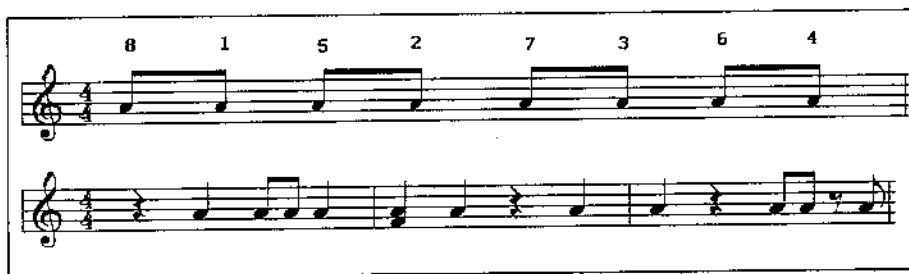


Figura 6: Distribución de probabilidades de corcheas en un compás de 4/4. La probabilidad de cada corchea se obtendría dividiendo el número indicado entre 36, que es la suma de dichos números. A continuación, tres compases que se obtendrían utilizando dicha distribución y obligando a que cada compás tenga 4 ataques. El acorde del segundo compás indica que se ha obtenido dos veces la

3.2.2 Sucesos dependientes: Música con memoria.

En los métodos anteriores la música obtenida no tiene memoria ya que el resultado de cada evento no influye en los sucesivos. En parte se puede corregir esto utilizando métodos aleatorios con sucesos que dependan de los anteriores, con lo cual la música ganaría en coherencia y dimensión temporal. Para ello tenemos que repasar otro concepto matemático: la probabilidad condicionada, que es la probabilidad de obtener un resultado en un suceso, en el supuesto de que en otro suceso se haya obtenido un resultado definido. Por ejemplo en el caso trivial anterior con la melodía aleatoria generada con las notas do-fa-sol, si quisiéramos generar una melodía donde cada nota dependa de la que haya salido anteriormente, tendríamos que definir las probabilidades condicionadas de que salga do y después fa, do y después sol, do-do, re-do, etc. Todo esto se expresa cómodamente mediante una tabla de transición (figura 7) de esta misma tabla se deduce también como influyen los sucesos anteriores en el actual; por ejemplo, la probabilidad de que se produzca la secuencia do-fa-sol, se obtiene multiplicando la de do-fa por la de fa-sol, es decir $0,4 * 0,3 = 0,12$, la probabilidad de "do-fa-sol-fa" sería $0,12 * 0,4 = 0,058$, y así sucesivamente.

		2ª nota		
		Do	Fa	Sol
1ª nota	Do	0	0,4	0,6
	Fa	0,5	0,2	0,3
	Sol	0,3	0,4	0,3

Figura 7: Tabla de transición de primer orden. Cada número representa la probabilidad de que ocurra la nota de la izquierda seguida por la de arriba. Por ejemplo, la probabilidad de la sucesión fa-do es 0,5 y la de do-do es cero (es decir, imposible). La suma de todas las probabilidades de cada fila horizontal tiene que ser igual a 1.

Como se puede apreciar, conforme la secuencia de sucesos es más larga, la probabilidad tiende a 0; es decir, a un suceso casi no le influye lo que haya ocurrido 3 sucesos antes. La tabla anterior es de primer orden. Si se quiere controlar cómo en un suceso influyen los dos anteriores, tendríamos que definir una tabla de segundo orden, en horizontal habría motivos de dos notas, por ejemplo do-do, do-re, do-mi, etc. y en vertical la

tercera nota posible; otra forma de expresarlo sería mediante una tabla de tres dimensiones, que es perfectamente expresable en la computadora, pero más difícil de imaginar. Es relativamente simple escribir un programa que genere secuencias de notas (o cualquier otro parámetro) de acuerdo con las probabilidades de las tablas de transición; en general; a las series de valores así obtenidos se les llama Cadenas de Markov.

El compositor puede diseñar las tablas de transición para favorecer más unos motivos que otros; cuanto de mayor orden sean las tablas, más larga será la influencia del pasado en el suceso presente.

En música, las Cadenas de Markov se han aplicado también junto con el método de Montecarlo, que consiste en realizar un análisis estadístico de un tipo de música determinado (folclórica, jazz, coral, etc.), para después tratar de generarla con la computadora basándose en las probabilidades de las tablas de transición en las frecuencias de aparición de cada motivo en dicha música. En los años 50, Harry Olson, el creador del sintetizador de la RCA, realizó un estudio estadístico de un conjunto de las melodías de Stephen Foster, contando las veces que se repetía cada nota, cada motivo de dos notas, de tres, etc., y realizando lo mismo con los ritmos. Las tablas de frecuencia obtenidas las utilizó como si se trataran de tablas de transición, experimentando la generación de melodías que producen. Se comprobó que usando tablas de primer orden, las melodías apenas se parecían a las de Foster; en las de 2° orden y aún más en las de 3° orden empezaba a reconocerse cierto estilo debido a la frecuencia con que aparecían determinados giros melódicos. Conforme el orden era mayor, más se parecía a la música preexistente. También procedió a filtrar la generación aleatoria mediante reglas extraídas del estilo; si dichas reglas eran demasiadas, se rechazaban todos los valores y no se obtenía ninguna melodía; por el contrario con pocas reglas el estilo no se parecía. Estos métodos, basados en las Cadenas de Markov y en el filtrado por reglas, fallan en las relaciones más distantes, es decir, en la forma; solo tienen memoria a corto plazo. Si queremos controlar a más largo plazo, se podrían utilizar tablas de transición de ordenes más altos, lo cual no es muy práctico ya que conforme creciera el orden se harían las tablas inmensamente grandes muy pronto.

3.3 Métodos deterministas

En los métodos aleatorios que hemos visto, el programa genera mediante azar los valores de los parámetros musicales; en los métodos deterministas la música se genera sin utilizar el azar, bien sea directamente aplicando algún método de composición, o bien aplicando transformaciones a un material musical de entrada. Al igual que los aleatorios, estos métodos pueden estar basados en la teoría musical, en teorías extramusicales que se estiman aplicables a la música o en la propia intuición del compositor.

3.3.1 Manipulaciones musicales

Muchas de las manipulaciones que se dan en la música y que son de tipo mecánico son fácilmente programables. Los editores de partituras y los secuenciadores MIDI suelen incluir bastantes de las mismas, veremos como son algunas de ellas para constatar lo útil que es la computadora para la realización de estas manipulaciones y ayuda que brindan para la creación de música. Comenzando por las manipulaciones en la altura; la transposición, que consiste en tocar un fragmento melódico más agudo o más grave, se trata simplemente de sumar o de restar un número fijo de semitonos a cada nota. La inversión que es cambiar el sentido de cada intervalo de la melodía, es también fácil de programar; lo mismo ocurre con la expansión y la compresión melódica, que consisten respectivamente en aumentar o disminuir proporcionalmente todos los intervalos melódicos.

En cuanto a las manipulaciones del ritmo, la aumentación y la disminución, como su propio nombre indica, consiste en aumentar o disminuir proporcionalmente todas las duraciones del motivo. Estas manipulaciones son multiplicativas, pero también se pueden concebir transformaciones aditivas, es decir sumar o restar una duración fija.

Manipulaciones globales como el cambio de tempo y la retrogradación (tocar un fragmento al revés en el tiempo), son también operaciones completamente mecánicas y por lo tanto fácilmente programables. El canon, como se sabe, es un método para componer a varias voces, en que cada voz toca lo mismo que la inicial pero transpuesto y retardado mediante el ordenador se pueden realizar tipos de canon más complejos, cuya notación en partitura e interpretación sería extremadamente difícil; por ejemplo, se puede tocar cada voz a un tempo distinto y variable. El compositor Conlon Nancarrow ha experimentado ampliamente en canones y ritmos complejos, realizando la mayor de su trabajo antes de la aparición del MIDI; para ello utilizó pianolas cuyos

rollos tenía que programar tediosamente, mientras que si hubiera tenido acceso a una computadora su experimentación se hubiera multiplicado por cien.

El dodecafonismo y la música serial se basan en mecanismos de composición que son también fácilmente realizables de forma automática. Por ejemplo, en primer lugar, para la búsqueda de la serie de doce sonidos que se utilizarán para la composición, mediante la computadora se puede averiguar, dentro de los casi 500 millones de permutaciones posibles de la serie de 12 sonidos, cuantas cumplen alguna propiedad determinada, como la de poseer todos los intervalos y además clasificarlas. Un método típicamente serial de componer consiste en ir asignando cada elemento de las diversas series (de alturas, ritmos e intensidades, etc.) a cada instrumento; obviamente, este es un trabajo muy adecuado para la computadora, mientras que el compositor podría dedicarse a mejorar los resultados, introduciendo variantes que flexibilicen la realización automática y aprovechen las oportunidades para que la música gane en interés.

3.3.2 Otros métodos

Otras vías más innovadoras se basan en utilizar métodos de composición pensados especialmente desde la computadora, ya sea procedentes de otras disciplinas o de nuevas teorías musicales.

Un método consiste en partir de una obra musical preexistente y mediante manipulaciones deterministas obtener un resultado que guarde poca relación con el original. Se empieza troceando una obra en diversos fragmentos temporales que posteriormente un programa, siguiendo una serie de reglas, se encarga de reordenar en el tiempo de distinta manera, e incluso cambiando los tempos y retrogradando algunos fragmentos. Diversos compositores lo han realizado sobre la señal de audio digital o sobre los datos musicales codificados (MIDI, notación tradicional, etc.).

Otro método muy utilizado consiste en aplicar ciertas proporciones numéricas, que tienen cualidades especiales, en todos los aspectos de la composición, desde la determinación de las alturas y ritmos a las duraciones de frases y secciones. Es una práctica que procede de los griegos, que estudiaron las proporciones geométricas en arquitectura y el arte. Ellos encontraron una famosa proporción entre cantidades, llamada "Segmento Aureo", que suele funcionar bien psicológicamente: aproximadamente es 1,618034. Con el ordenador se puede aplicar rigurosamente ésta u otras proporciones a los diversos parámetros

musicales, pudiendo comprobar inmediatamente los resultados que se obtienen.

La teoría de conjuntos se ha empleado para sistematizar y automatizar la búsqueda de armonías determinadas de acuerdo con las condiciones dadas por el compositor, siendo la aplicación más sencilla la armonización de una melodía. La misma teoría también se emplea para manipular materiales musicales utilizando las operaciones sobre conjuntos, como la unión, la intersección, la complementación, etc.

El teórico y compositor Joseph Schillinger en su libro "Las bases matemáticas de las artes" (1948) propuso una teoría científica para las artes que relacionara sus formas físicas con las respuestas emocionales. Se trata de medir nuestra percepción de la obra de arte, para después utilizar estos datos en la creación, con lo que los objetos artísticos están concebidos como obras de ingeniería. Trató de establecer una teoría que sirviera tanto para analizar las obras como para sintetizarlas; en su tratado de composición hay muchos ejemplos musicales generados mediante métodos matemáticos, que son perfectamente traducibles en programas de ordenador.

3.4 Varios métodos procedentes de las matemáticas, la física y otros campos extramusicales.

Al igual que la geometría es de gran utilidad para las artes visuales, las matemáticas vienen propiciando inspiración para muchos métodos de composición por computadora. Veremos algunos métodos que pueden combinar lo aleatorio y lo determinista; todos ellos tienen en común el que proceden de campos extramusicales o han sido aplicados con anterioridad en disciplinas distintas de la música. Algunos, como los fractales, proceden de la geometría, pero su aplicación musical es tan obvia como sorprendente. Otros, como los sistemas dinámicos no lineales, provienen de las matemáticas y de la física y aunque son deterministas dan resultados bastante imprevisibles.

3.4.1 Fractales

El término fractal viene de la geometría; su padre, Benoit B. Mandelbrot, matemático investigador de IBM, estuvo siempre muy interesado en ciertos fenómenos geométricos que no encajaban fácilmente en las teorías normales. Reunió a muchos de ellos en algunas publicaciones, como en su libro *The Fractal Geometry of Nature*, y los relaciono más o menos en un tronco común: la geometría fractal. Hay muchos tipos de fractales; el más típico es, grosso modo, una curva o línea quebrada que lo es tanto que la longitud de cualquier parte de ella es infinita. Además su dimensión es una fracción entre 1 y 2, es decir, un fractal es algo entre una línea cuya dimensión es 1 y una superficie cuya dimensión es 2.

Lo elegante es que estas líneas se pueden generar por medio de operaciones matemáticas o geométricas muy sencillas repetidas una y otra vez. Una propiedad muy importante es la autosemejanza, lo que significa que sus formas se repiten tanto en escala pequeña como en grande. Lo realmente espectacular es que algunas de estas líneas recuerdan muchísimo a las formas de la naturaleza, como el perfil de una isla, el de un grano de arena o los nervios de una hoja. Con ello Mandelbrot demuestra su validez como mejores modelos de la naturaleza que las líneas geométricas clásicas (triángulo, círculo, etc.) y además puede ser otra prueba de lo sabia y económica que es la naturaleza para manejar información. "lógicamente, donde más pronto encontró aplicación todo esto fue en las artes plásticas, concretamente en los gráficos por computadora".

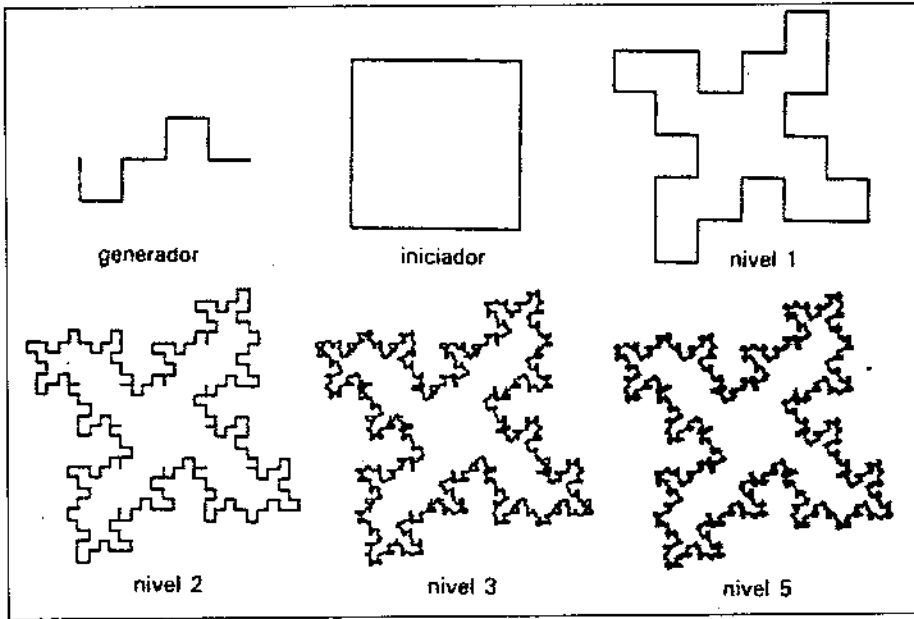


Figura 8: Generación de un fractal partiendo del iniciador (en este caso un cuadrado) y del generador (una línea quebrada), el nivel 1 se obtiene sustituyendo cada segmento del iniciador por el generador. Para obtener el nivel 2 se realiza lo mismo en cada segmento del nivel 1. Continuando sucesivamente hasta el infinito se obtendrá el fractal

3.4.1.1 Ruido $1/f$ y música

La utilización de los fractales en la composición automática no tardo en llegar, en parte gracias a los descubrimientos de Voss y Clarke quienes hacia 1976 analizaron estadísticamente diversos estilos de música. Para ello midieron dos propiedades que se emplean normalmente para analizar series aleatorias o ruidos: la densidad espectral de potencia y la autocorrelación. Simplificando, se puede decir que la densidad espectral de potencia indica lo que fluctúa la potencia en cada frecuencia, y la autocorrelación mide la relación que hay entre el valor de esa señal en un momento determinado y los que tuvo en el pasado, es decir, lo predecible que es. Existen en la naturaleza tres ruidos típicos: el ruido blanco, el pardo y el $1/f$ (ver figura 9), existe un estándar que define cuatro ruidos de colores, (el blanco, rosa, azul y negro) y es considerada la fuente oficial (The Federal Standard 1037C *Telecommunication*) estándares no oficiales existen también para ruidos de otros colores, (por ejemplo el pardo), y el ruido $1/f$ también es nombrado ruido rosa. El ruido blanco, al igual que la luz blanca, contiene

todas las frecuencias, por lo que su densidad espectral es constante; su autocorrelación es cero, lo que significa que sus variaciones son totalmente impredecibles, y equivale aun proceso aleatorio con distribución uniforme. El ruido pardo a "browniano" tiene una densidad espectral que varía con $1/f^2$ (siendo f la frecuencia), y su autocorrelación es alta; es decir, tiende a variar lentamente y es bastante predecible en fragmentos cortos. Y por último, hay un ruido cuya densidad espectral varía como $1/f$ y que tiene la propiedad de que su autocorrelación es la misma en todas las escalas de tiempo, lo que quiere decir que el valor en un instante está igual de "influido" por el valor anterior, que por los 10 valores anteriores que por los 100 anteriores, y así sucesivamente con 1000, 10000 etc.; es decir, es el ruido que más memoria tiene.

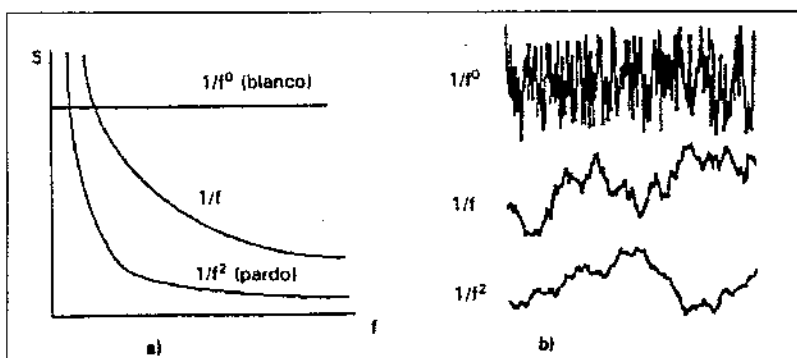


Figura 9: a) Variación de la densidad espectral de potencia (S) respecto a la frecuencia (f) de los ruidos blanco ($1/f^0$), $1/f$ y pardo o "browniano" ($1/f^2$). Obsérvese la rápida caída en frecuencias altas en el ruido pardo, el blanco es constante y el $1/f$ es intermedio. b) Muestras (gráfico amplitud-tiempo) de los tres tipos de ruido. El blanco es muy impredecible y varía muy rápidamente, el pardo varía lentamente y es más predecible. El $1/f$ es "moderadamente" impredecible.

Esta autocorrelación del ruido $1/f$ se traduce en autosemejanza que en este caso es estadística y no exacta como en el fractal, aunque en éste se tiene un comportamiento estadístico idéntico al ruido $1/f$. Y ocurre que también muchas cantidades que fluctúan con el tiempo en la naturaleza se comportan como el ruido $1/f$: así el nivel de las inundaciones de los ríos, el ruido en semiconductores, la actividad de las manchas solares, el tráfico en una autopista,... y la música. Efectivamente, Voss y Clark tomaron diversas señales procedentes de programas de radio con músicas de diversos estilos y midieron durante intervalos largos la densidad espectral de las fluctuaciones lentas de la potencia sonora (amplitud) y de la frecuencia, es decir, la evolución estadística de las notas y las frases de la melodía. Observaron que su gráfico se parece mucho al del ruido $1/f$. En

bajas frecuencias, correspondientes a fragmentos de unos 5 minutos las gráficas de los estilos blues-jazz y rock se hacen más horizontales (más parecido al ruido blanco), lo que es debido a que dichos estilos se dan en composiciones cortas, no teniendo cada una correlación con la siguiente. Este comportamiento tipo $1/f$ de la música no nos debe extrañar, ya que esta tiene, por lo general, una estructura muy jerárquica: notas, frases, secciones, etc.; lo cual es análogo a la autosemejanza del ruido $1/f$ y de los fractales, que es también una forma de jerarquía aunque más primitiva.

3.4.1.2 Demostración con fragmentos musicales

A modo de ejemplo vamos a explicar como los programas para computadora generan melodías aleatorias siguiendo los tres tipos de ruidos (blanco, pardo y $1/f$) asignando los valores a duraciones y alturas de notas. Las alturas se tomarán de las 2 octavas sobre el Do central y utilizando solo la escala de Do, y las duraciones podrán ser de semicorchea, corchea, negra y blanca. Para la melodía tipo ruido blanco, el programa debe realizar una simulación del experimento aleatorio siguiente: se introducen 15 bolas distintas en una urna correspondientes a las 15 notas y otras 4 bolas en otra urna simbolizando las cuatro duraciones. Para obtener cada nota se extrae al azar una bola de cada urna; supongamos que obtenemos respectivamente 11 y 1, esto nos proporcionaría la primera nota, el Fa agudo semicorchea, de la melodía "ruido blanco" (ver figura 10 "melodías de ruidos"). Devolvemos las bolas a las urnas y repetimos el procedimiento sucesivamente.

En el ruido pardo lo que es aleatorio no es el valor en sí, sino el intervalo que se suma o resta al valor previo. El programa de ordenador simularía lo siguiente: se introducen en una urna bolas con los números -2, -1, 1 y 2, que corresponden al intervalo a restar (descender) o sumar (ascender) a la nota anterior; en la otra urna se introducen los mismos números (-2, -1, 1, 2) correspondientes al intervalo en duración a restar o sumar a la duración anterior. Partiendo de la primera nota, Si negra, obtenemos de nuestras urnas -2 y +1, lo que nos da la segunda nota, un Sol (descendiendo 2 desde el Si) que dura una blanca (de negra a blanca se "asciende" 1). Lógicamente, puede llegar un momento en que la melodía se salga de los límites en altura o en duración. Para evitarlo, se pueden programar diversas condiciones: si los bordes son "no reflectantes", la melodía se queda pegada al borde hasta que obtiene un intervalo que la "despega"; en los bordes reflectantes, se hace como si la melodía hubiera rebotado, invirtiendo el sentido del intervalo que sobrepase el borde. En los

bordes elásticos, conforme no acercamos a un borde la probabilidad de acercarse más disminuye.

Para la melodía “ruido $1/f$ ” utilizaremos un procedimiento sugerido por Voss que lo aproxima bastante bien. Supongamos que queremos una melodía de 8 notas, para ello lanzamos tres dados de distintos colores. Los números de orden de las 8 notas de la melodía se escriben en la tabla (ver figura) del 0 al 7 y en sistema binario: 000, 001, 010, hasta 111. Se asigna un dado a cada uno de los tres bits. Por ejemplo, el dado rojo al bit menos significativo, el verde al bit medio y el azul al más significativo. Cada nota de la melodía se obtiene sumando los tres valores obtenidos lanzando los tres dados, pero teniendo en cuenta que solo se lanza cada dado cuando su bit cambie. Las sumas posibles de tres dados varían entre 3 y 18, es decir 15 valores en total que se asignan a las mismas notas de los dos ejemplos anteriores. Al haber dados que no varían de una nota a otra la melodía parece que “recuerda” de alguna manera los valores anteriores y tiene una estructura jerárquica en tres niveles. La melodía $1/f$ de la figura “melodías de ruidos” fue realizada por un procedimiento equivalente a éste con más dados y aplicando también a las duraciones. En teoría, el ruido $1/f$ se podría obtener de esta manera mediante un número infinito de dados con infinitas caras cada uno.



Figura 10: “melodías de ruidos” Melodías tipo ruido blanco, $1/f$ y pardo o “browniano” generadas por la computadora

Como puede apreciarse en la figura la melodía de tipo ruido blanco es muy impredecible y aleatoria; en cambio, la del ruido pardo procede muy gradualmente y es demasiado predecible. Recuerda a un borracho dando tumbos, no se sabe hacia donde dará el próximo paso pero sí que no se

alejará mucho de su posición anterior. La música 1/f es un caso intermedio y es "casi buena", acercándose bastante a la música normal, como han corroborado muchos profesionales y aficionados según Voss; por lo que éste sugirió que la música aleatoria debe de realizarse utilizando ruido 1/f en vez de usar el ruido blanco.

número de nota en binario			resultados			melodía resultante	
dados			dados			suma	nota
azul	verde	rojo	azul/verde	rojo			
0	0	0	6	2	1	9	re5
0	0	1			4	12	sol5
0	1	0		4	3	13	la5
0	1	1			1	11	fa5
1	0	0	3	1	2	6	fa4
1	0	1			5	9	re5
1	1	0		3	1	7	si4
1	1	1			2	8	do5

Figura 11

En la figura 11 vemos en tabla el experimento para generar una melodía 1/f de 8 notas. Las flechas significan que los dados conservan el mismo valor de la nota anterior y no se lanzan.

En el procedimiento de Voss que utilizamos para generar ruido 1/f, que acabamos de ver, se observa que la estructura de la frase musical es binaria, es decir, se subdivide en dos periodos, estos a su vez en dos frases y así sucesivamente. Ello es debido a que los dados se lanzan o se dejan de lanzar de una manera impuesta por la sucesión de números binarios; la estructura musical se puede flexibilizar si se hace aleatorio el número de dados que se lanza cada vez para conseguir cada nota, estableciendo, por ejemplo, que sea más probable lanzar los dados de más bajo nivel y lo más improbable el lanzar todos los dados simultáneamente. El ruido obtenido ya no es rigurosamente 1/f pero sí tendrá autosemejanza. Otra variante, llamada "dado ponderado", consiste en multiplicar el resultado de cada dado por un número distinto (peso) antes de sumar. Por ejemplo, se podría multiplicar el dado azul (el de más alto nivel) por 4, el verde por 2 y el rojo dejarlo tal cual. De esta manera, los cambios serían más dramáticos cuando se lanza un dado de alto nivel con lo que las frases quedarían más diferenciadas.

3.4.1.3 De la geometría fractal a la música

A continuación vamos a ver utilizaciones de los fractales en la composición automática determinista. Observaremos su traducción más o menos literal a melodías o secuencias de parámetros musicales.

En una figura anterior vimos un ejemplo de la construcción de una curva fractal mediante el iniciador y el generador. Si imaginamos que estas dos líneas son melodías, la traducción de este proceso en música no es demasiado forzada. El musicólogo H. Schenker diseñó un método para analizar la música que se puede implementar en la computadora y que es autosemejante en varios niveles. Lo probó aplicándolo al análisis de bastantes partituras y su desarrollo recuerda mucho a la forma de generar un fractal, pero a la inversa, es decir, comenzando con la pieza musical, la reduce despojándola de los adornos, después reduce esta reducción y así sucesivamente hasta quedarse con una melodía que resume la evolución maestra de la pieza. Este análisis saca a la luz que en muchas obras los compositores, quizás inconscientemente, repiten motivos en distintos niveles jerárquicos, al igual que ocurre en los fractales.



Análisis musical derivado de las teorías de Schenker sobre la música tonal. Esta frase de Mozart se puede reducir a un gesto de dos notas descendentes. Hay sistemas expertos que realizan tipos de análisis como éste.

La traducción musical de cómo se construye un fractal es inmediata; ahora el generador podría ser un motivo musical que habría que repetir en distintas escalas.



Figura 12: Traducción musical del desarrollo de un fractal. El motivo de tres notas hace las funciones de iniciador y generador. Cada nota se va sustituyendo por el motivo transportado y reducido en duración convenientemente.

Una variante “más rigurosa” podría ser que en las copias del motivo a menor escala se tendrían que reducir no solo las duraciones sino también los intervalos, pero nos saldríamos de nuestra familiar escala temperada. Desarrollos como el de la figura anterior se pueden realizar directamente utilizando un editor de partituras o un secuenciador. Se podría continuar sucesivamente con el proceso de la figura hasta llegar al límite de resolución del sistema (gráficos, MIDI, etc.) o de nuestro oído, que en duración es de unos 50 milisegundos; a partir de ahí no se oirían las notas individuales sino un continuo sonoro. También se podría utilizar como iniciador una melodía preexistente y como generador un motivo pequeño que habría que ir sustituyendo por cada nota de la melodía.

El programa de desarrollo de los fractales musicales ha de ser lo más interactivo posible, ya que cada pequeño cambio en el generador da lugar a resultados casi imprevisibles, por lo que la búsqueda ha de realizarse por tanteo. Los resultados, en general, suelen ser un poco crudos para poder utilizarlos más allá de cómo acompañamientos aunque no estarían muy alejados de la estética repetitiva. El compositor Charles Dodge, consideraba que se podría hacer más aleatorio este proceso añadiendo ruido “browniano” en las alturas, es decir, sumar o restar un intervalo aleatorio a cada nota. (Ver figura 13), con lo que se le daría a la melodía más el carácter de “cordillera”; o utilizando ruido blanco en uno o varios niveles si se quieren saltos más impredecibles. Por supuesto, estas mismas variantes aleatorias se pueden extender a ritmos u otros parámetros.

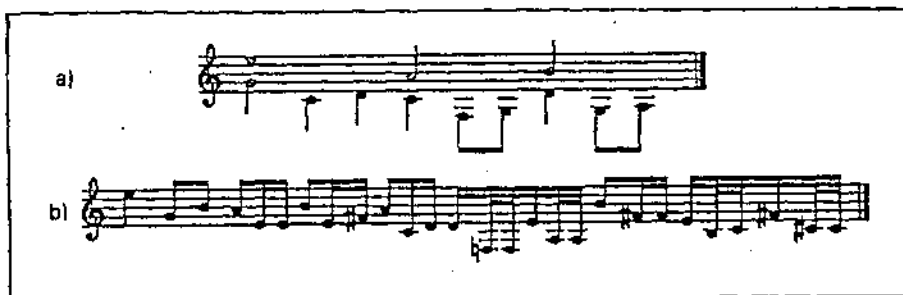


Figura 13:

- a) Polifonía a dos voces con el motivo de la figura anterior
- b) Melodía obtenida como en la figura anterior excepto añadiendo en el tercer nivel un ruido "browniano" consistente en un intervalo de segunda ascendente, descendente o dejarlo tal cual.

Un problema que hay que tener en cuenta en la aplicación de la geometría fractal a la música es que la percepción del espacio es distinta que la del tiempo. No se relaciona fácilmente la percepción de un motivo corto con el mismo tocado más lentamente. Tampoco la música, por desarrollarse en el tiempo, es simétrica; siempre hay un antes y un después que influyen sobre todo en la percepción de las duraciones. Al final de una canción todo parece que dura más. Esto también se corresponde con la práctica intuitiva de los compositores, que tienden a acelerar la música o a abreviar las repeticiones hacia el final de sus composiciones.

3.4.2 El caos y los sistemas dinámicos no lineales

Un grado de control distinto se obtiene con los métodos basados en los sistemas dinámicos no lineales, rama de la ciencia que está relacionada con el estudio del caos y los fractales. Hasta hace pocas décadas, los científicos han considerado el caos algo gobernado por el azar; la teoría de los sistemas dinámicos trata de encontrar modelos deterministas que expliquen y puedan predecir completamente un comportamiento caótico. Un sistema dinámico suele caracterizarse por una simple ecuación iterativa, es decir, que esta expresada en función del resultado que dicha ecuación tomo anteriormente. Se puede observar la "historia" de los valores que va tomando a partir del inicial, y observar diversos fenómenos, por ejemplo, que la ecuación tiende hacia un valor estable ("muerte"); oscila repitiendo varios valores fijos; se comporta de un modo caótico que recuerda al ruido blanco o sus valores describen ciertos patrones ("atractores").

Un ejemplo es la Ecuación Logística, que se ha utilizado para modelar el crecimiento de una colonia de individuos, por ejemplo los peces de un estanque. Su expresión es $X_{n+1} = rX_n(1-X_n)$, (figura 14) el parámetro "r" indica la velocidad de crecimiento de la colonia, X_n indica la cantidad de individuos en un año determinado (o la unidad de tiempo que se utilice) y varía entre 0 y 1; X_{n+1} es lo mismo para el año siguiente. Si $r = 2,5$ y $X_1 = 0,19$; X_2 se obtendrá multiplicando $2,5 \cdot 0,19 \cdot 0,81 = 0,385$; el siguiente valor X_3 será $2,5 \cdot 0,385 \cdot 0,615 = 0,592$; operando así sucesivamente se obtienen los valores posteriores: 0.604, 0.598, 0.601, 0.600, 0.600, 0.600,... y este último valor se repetiría para siempre, es decir la ecuación tiende a estabilizarse; de hecho ocurre que sea cual sea la X de partida siempre acabará estabilizándose en 0.6, éste punto de equilibrio varía con r. curiosamente si r es igual o mayor que 3, no se estabilizará en un valor, sino que la ecuación acabará oscilando entre dos valores fijos; a partir de 3,54409 haría lo mismo con ocho valores y conforme aumentará r entramos en una región caótica donde los resultados de la ecuación parecen aleatorios. Dentro de este caos hay algunas zonas en que se producen periodicidades como la de $r = 3,82840$ en que oscila entre tres valores.

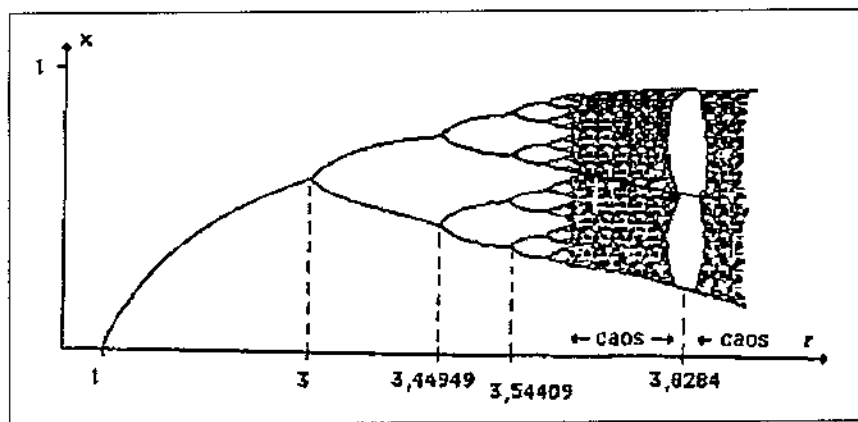


Figura 14: Representación gráfica de los valores de estabilización de x con relación a "r" en la ecuación logística; para llegar a éstos se necesitan aproximadamente unas 400 iteraciones

Un ejemplo de aplicación inmediata podría ser la generación de una melodía. Supongamos que los valores de x se hacen corresponder con alturas y se mantiene siempre la misma duración; si el programa permite variar en tiempo real la "r", se podría pasar de un arpeggio que repite varias

notas a una melodía que, de pronto, empieza a comportarse caóticamente. Las posibilidades que se brindan son muchas, si se aplica a distintos parámetros musicales.

3.4.3 Inteligencia artificial

La inteligencia artificial es una actividad que no se ha definido concretamente si es una ciencia, técnica, arte, etc. pero que se encarga de estudiar el comportamiento inteligente (sin que éste se haya definido tampoco). Un ente (máquina para este caso) que se comporta inteligentemente se caracteriza por tener unos objetivos y realizar unas acciones para conseguirlos, estando guiadas éstas por un conocimiento sobre el “mundo” que le rodea. La IA tiene muchas áreas de estudio, por ejemplo la robótica, proceso de lenguaje, y los sistemas expertos, siendo ésta última la que ha encontrado más aplicaciones comerciales. Un sistema experto consta de dos partes: una máquina de inferencia y una base de conocimiento (figura 15). En ésta última se almacenan todos los datos sobre el tema de que se trate y las reglas para manipularlos. La máquina de inferencia es independiente del tema. El estilo de programación en la IA es de tipo declarativo, ya que hay que “declararle” a la base de conocimiento como es el “mundo” y después el programa reacciona ante éste, comportándose como un verdadero experto que resuelve los problemas combinando conocimientos y razonamiento. Por el contrario, el clásico estilo de programación es de tipo “de procedimiento”: hay que decirle a la computadora como ha de hacer todo paso a paso.

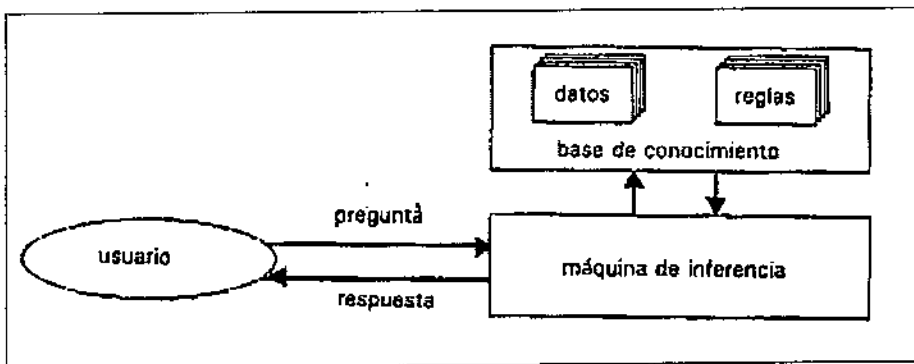


Figura 15: Esquema de un sistema experto: Mediante la máquina de inferencia ejecuta secuencias lógicas con lo previamente almacenado en la base de conocimiento hasta encontrar la respuesta a la pregunta del usuario.

En la base de conocimiento de un sistema experto para composición se almacenarían datos como por ejemplo las notas musicales, duraciones, instrumentos, etc., y las reglas del contrapunto, armonía, o del estilo que defina el compositor. Es muy difícil codificar el conocimiento musical en forma de reglas y es igual difícil emplear un sistema experto para la composición. Hay un sistema experto que actúa por capas; primero genera los acorde, después la melodía base, los adornos melódicos y para terminar añade el bajo y la percusión. Este sistema, actúa de una manera parecida a los programas de jugar ajedrez, buscando una buena “jugada” musical en cada momento de la pieza. Otro ejemplo de sistema experto por ejemplo el que trabaja de forma interactiva, es decir, el programa no genera la pieza completa sino que va proponiendo al compositor nuevos motivos a partir de lo que ya existe, siendo éste quien decide si los rechaza o los incorpora para posterior desarrollo. Muchos opinan, con bastante razón, que el músico no compone exactamente como los modelos de sistemas expertos que propone la IA, es decir, su pieza no la obtiene aplicando rigurosamente las reglas para la solución de un problema, sino que intuitivamente se le van ocurriendo patrones (rítmicos, melódicos, etc.) que luego ensambla de diversas maneras. Esto último enlaza con otro campo de investigación; “las redes neuronales” de las que se espera que modelen mejor el pensamiento humano.

3.5 Características

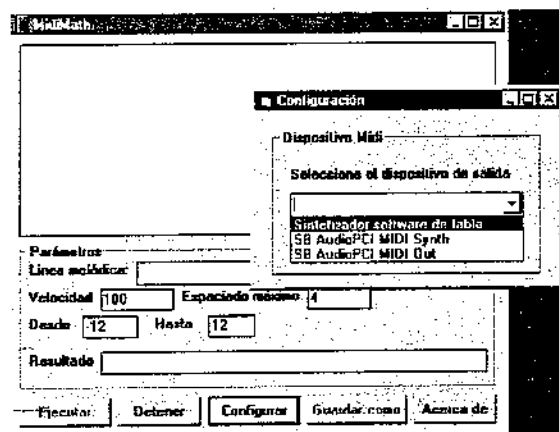
La tecnología de la generación automática de música tiene una difusión muy escasa, solo músicos de amplia trayectoria y curiosos conocen su existencia, pero muy pocos saben como usarla realmente. Y es que en realidad no hay una tecnología propiamente dicha sobre esto. Las aplicaciones para la composición de música automática son; como lo es en general la composición musical, una obra personal y de uso particular, de tal suerte que aplicaciones comerciales de éste tipo realmente no existen. La generación de tales aplicaciones es un trabajo de programación en computadoras y esta programación tiene que correr a cargo de alguien que sepa programar, y no significa con esto que todos los músicos interesados tengan que saber programar, alguien puede programar por ellos las reglas musicales que ellos deseen. Al ser de elección personal el camino a seguir en cuanto a la programación, ésta como los lenguajes de programación y las plataformas en las que se trabajará no siguen un estándar en ningún caso, además de que en varios casos las reglas programadas, además de contener reglas musicales, se apegan también a reglas de la naturaleza, lo que requiere de un conocimiento de las ciencias de las que se tome el caso y de las matemáticas para poder sintetizar los comportamientos de la

naturaleza combinados con la reglas musicales. En resumen, en ésta actividad interactúan varias disciplinas y el uso de la tecnología (también la creación) se orienta a personas con conocimiento de todas ellas o a personas que formen grupos de trabajo en los que cada persona aporte lo que sabe a un proyecto. Un ejemplo muy famoso (el mas famoso de todos) de la generación de ésta tecnología y de la creación de música con ella lo tenemos en la persona de Iannis Xenakis. Compositor considerado *padre* de la música automática y matemática, veremos una breve reseña de él mas adelante.

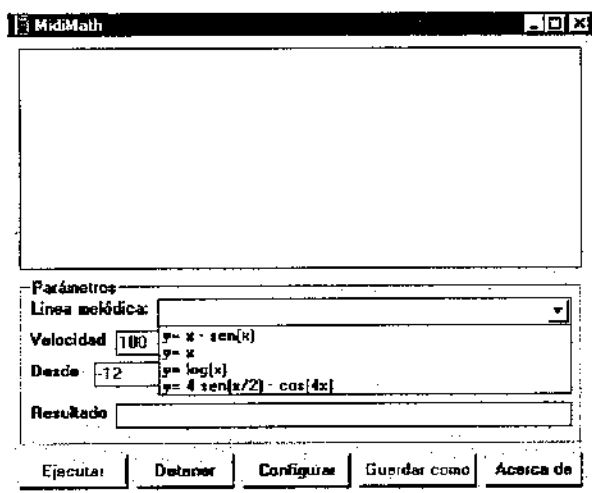
Aunque no existen aplicaciones comerciales si existen aplicaciones comerciales como el Cakewalk Pro Audio que ya mencionamos antes que incluyen procedimientos con los que a partir, por ejemplo de un acorde se puede generar un arpeggio, con la modificación de varias variables dentro del programa, pero en general no es mucho como para componer. También hay aplicaciones libres para la composición automática, éstas se pueden encontrar para cualquier plataforma, pero su localización no es fácil un ejemplo de estas aplicaciones para la PC con Windows es el "MidiMath" aplicación gratuita descargable desde el sitio <http://midimath.tucajon.com> una aplicación de Álvaro L. Maroto Conde, y la explicación de él mismo sobre la aplicación:

3.6 MidiMath

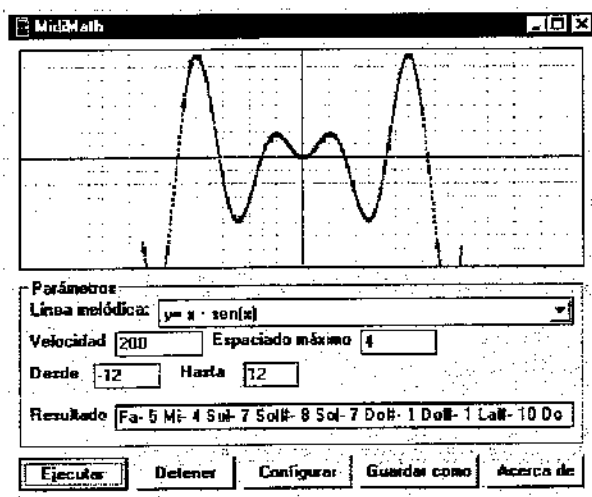
"Una vez aparecida la aplicación, lo primero que deberemos hacer es configurarla, haciendo click sobre *Configurar*. Dentro elegiremos el dispositivo de salida apropiado (en la mayoría de los casos *Sintetizador Software de tabla*). El contenido de esta caja puede variar con respecto a la imagen presentada.



Una vez configurado, pasamos a elegir la *línea melódica*, tomando una de las tres propuestas. La razón por la que no se incluyen más posibilidades en esta opción es porque el programa está concebido para ser una pequeña demostración, sin ánimo de llegar a más:



En una primera selección, elegiremos la ecuación matemática $y = x \cdot \text{sen}(x)$. Una vez seleccionada, no tenemos más que pulsar en el botón **Ejecutar** para obtener la representación matemática de la ecuación, así como el producto sonoro y escrito del programa:



Se puede observar la función de color azul, y cada nota seleccionada e interpretada, de color rojo. Una vez hecha la aproximación, explicaré la filosofía del programa: Introducida una función matemática cualquiera (en este caso disponemos de tres posibles), realiza una representación gráfica, de la cual selecciona, conforme a un criterio, una serie de puntos. Cada punto en altura (líneas grises) equivale a un semitono. Cuando se selecciona uno, se encaja en el semitono más cercano (línea gris) y se transforma en nota musical, la cual es interpretada y almacenada. El criterio para determinar qué nota es la que se interpreta depende del número introducido en la casilla *Espaciado máximo*, en este caso con el valor 4. Este valor informa al programa que como máximo cada 4 casillas o unidades de tiempo ha de seleccionar una nota. En este punto introduzco un criterio de aleatoriedad, el cual da riqueza al producto creado. Esto quiere decir que se establece el máximo, pero queda a merced del computador el punto exacto en ese intervalo. Así mismo, podemos establecer el inicio y el fin de la representación gráfica (y producto musical) mediante las casillas *Desde* y *Hasta*. El último parámetro que queda por definir es el de la *Velocidad* de ejecución, en este caso establecido a 200. Como resultado, se observa la representación de la gráfica, y una caja de texto con las notas resultado de la operación, con su correspondiente número de semitono (es decir, el número que las genera).

Por último agregar que la aplicación se ha diseñado con soporte de archivo MIDI, esto es, el resultado se puede almacenar en un archivo estándar, editable por cualquier otro programa de secuenciación o edición de partituras, ya sea Cakewalk, Sibelius, Finale, Cubase, etc... Simplemente marcando en la opción *Guardar como* obtendremos el resultado.

El uso del producto final es ahora, bajo mi punto de vista, materia prima para sucesivas transformaciones, de las manos del compositor, hasta transformar estas 'ideas' en entidades de mayores dimensiones. El computador ha de considerarse como una herramienta, que en determinados casos y bajo determinadas perspectivas asume roles anteriormente asignados al hombre. Pero no podemos olvidar la base de todo este sistema: *El computador es programado por el hombre.*²⁵

²⁵ Álvaro L. Maroto Conde
Profesor de Acompañamiento y Repentización del
Dpto. de F. de Composición del CPM Manuel Carra
Ingeniero Técnico en Informática de Sistemas

3.7 Iannis Xenakis

3.7.1 Biografía

A los 10 años se trasladó con su familia a Grecia, comenzando luego estudios de ingeniería en Atenas. Sus estudios se interrumpieron en 1941 con la ocupación nazi a su país. Participó en la resistencia griega durante la Segunda Guerra Mundial, y en la primera fase de la Guerra Civil Griega como miembro de la compañía de estudiantes Lord Byron del Ejército de Liberación del Pueblo Griego (ELAS). En enero de 1945 recibió una grave herida de obús en un lado de la cara que lo puso al borde de la muerte, provocándole la pérdida de un ojo desfigurándole parte del rostro. En 1946 pudo finalizar sus estudios obteniendo el título de ingeniero, pero fue perseguido debido a su activismo político, y condenado a muerte. Logró escapar y, gracias a un pasaporte falso, cruzar la frontera rumbo a Francia en 1947.

Establecido en París, en 1948 ingresó el estudio del famoso arquitecto Le Corbusier como ingeniero calculista. Pronto comenzó a colaborar en los proyectos de varias obras importantes salidas del estudio de Le Corbusier durante esos años, como las unidades habitacionales de Nantez (1949), Briey-en-Forêt y Berlin-Charlottenburg (1954), los diferentes edificios constitutivos del plan de urbanización de Chandigarh en India (1951), y el Centro Deportivo y Cultural de Bagdad (1957). En estas obras Xenakis aplicó los mismos procesos compositivos y estéticos que en sus obras musicales de la época.

Xenakis diseñó además dos importantes obras de la arquitectura del siglo 20: el Convento de Sainte-Marie-de-la-Tourette (1953), y especialmente el Pabellón Philips de la Exposición Internacional de Bruselas de 1958, basado en las mismas estructuras que su obra orquestal *Metastasis* de 1953-1954. Para el interior del Pabellón se le encargó a Edgar Varèse que realizara la música, quien compuso su *Poème Électronique*, y el propio Xenakis compuso *Concret PH* para el espacio de acceso.

Durante esos años, Xenakis comenzó paralelamente sus estudios de composición en París, primero con Arthur Honneger y Darius Milhaud, con quienes no tuvo demasiado entendimiento, y finalmente con Olivier Messiaen, con quien sí estudió regularmente a partir de 1952. En 1955 Hans Rosbaud dirigió en el Festival de Donaueschingen su primer obra importante para orquesta: *Metastasis*. Esta pieza y las que le siguieron, notablemente *Phitoprakta* de 1955-1956, y *Achorripsis* de 1956-1957, así

como artículos publicados en los *Gravesaner Blätter*, la revista que dirigía Hermann Scherchen, le dieron a Xenakis una notoriedad que finalmente le permitió dedicarse exclusivamente a la composición.

En 1963 publicó *Musiques Formelles* (Músicas formales), posteriormente revisada, expandida y publicada en inglés como *Formalized Music: Thought and Mathematics in Composition* en 1971, y nuevamente ampliada y revisada para la segunda y definitiva edición de 1990; una colección de ensayos sobre sus ideas musicales y técnicas compositivas, considerada una de las contribuciones más importantes a la teoría de la música del siglo XX.

Pionero del uso de la computadora en la composición musical algorítmica, Xenakis fundó en [1966] el EMAMu, conocido a partir de 1972 como CEMAMu (Centre d'Études de Mathématique et Automatique Musicales), instituto dedicado al estudio de aplicaciones informáticas en la música. Allí Xenakis concibió y desarrolló el sistema UPIC, que permite la realización sonora directa de la notación gráfica que se efectúa sobre una tableta.

3.7.2 Obra

Ya en *Metastasis*, Xenakis muestra un alejamiento radical de las tendencias preponderantes en la vanguardia de la época, dominada por el serialismo y el post-serialismo. La obra plantea densos bloques sonoros, con los instrumentos de cuerda haciendo glissandos de diferentes velocidades, configuran masas y superficies de variadas texturas. Pero además de su radical estética "brutalista", esta obra resultó revolucionaria por su modalidad compositiva, en la que las densidades, las texturas, y los comportamientos individuales de los eventos estaban determinadas por procesos formales basados en leyes estadísticas y probabilísticas. De esta manera Xenakis se muestra igualmente distante del pensamiento de ordenamiento lineal de los serialistas y pos-serialistas, como de la indeterminación aleatoria que había iniciado John Cage, y que estaba comenzando a tener sus repercusiones entre los compositores europeos.

En "*La crise de la musique sérielle*", Xenakis planteó sus críticas a la técnica serial (lo que él denominaba "pensamiento lineal"), escribiendo lo siguiente respecto al grado de complejidad al que había llegado el contrapunto serial: "*La polifonía lineal se destruye por su propia complejidad; lo que se oye no es en realidad más que una masa de notas en diversos registros. La enorme complejidad impide al oyente seguir el entramado de las líneas, y tiene como efecto macroscópico una dispersión*

irrational y fortuita de sonidos a lo largo de toda la extensión del espectro sónico. Hay por tanto una contradicción entre el sistema polifónico lineal y el resultado percibido, que es de una superficie o masa. Esta contradicción inherente a la polifonía desaparece cuando la independencia del sonido es total.²⁶

Como alternativa propuso la utilización de modelos matemáticos en la composición musical, creando "un mundo de masas sonoras, vastos grupos de eventos sonoros, nubes y galaxias gobernadas por nuevas características como densidad, grado de orden, nivel de cambio, las cuales requieren definiciones y realizaciones usando la teoría de probabilidad"²⁷. Para Xenakis esta nueva concepción era de hecho más general que el pensamiento lineal, ya que lo podía incluir como un caso particular, reduciendo la densidad de las nubes. Xenakis crea de esta manera la "música estocástica".

Algunos de los procedimientos utilizados son en sus composiciones incluyen la teoría de probabilidades (teoría cinética de gases de Maxwell-Boltzmann en *Pithoprakta*, distribución aleatoria de puntos en un plano en *Diamorphoses*, restricciones mínimas en *Achorripsis*, distribución gaussiana en *ST/10* y *Atrées*, cadenas de Markov en *Analogiques*), la teoría de juegos (en *Duel* y *Stratégie*), la teoría de grupos (en *Nomos Alpha*), y el álgebra booleana (en *Herma* and *Eonta*). En consonancia con su uso de teorías probabilísticas, muchas de la piezas de Xenakis son, en sus propias palabras, "una forma de composición que no es el objeto en sí, sino una idea en sí, esto es, los comienzos de una familia de composiciones".

3.7.3 Lista de Obras

Algunas de sus obras más destacadas son:

- *Metastasis* (parte tercera del tríptico *Anastenaria*) (1953-1954), para orquesta de 60 músicos
- *Pithoprakta* (1955-1956), para orquesta de 49 músicos
- *Eonta* (1963), para piano y 5 instrumentos de cobre
- *Oresteia* (1965-1966), sobre textos de Esquilo, suite para coro infantil, coro mixto con accesorios y conjunto de 12 músicos
- *Terretektorh* (1965-1966), para 88 músicos dispersados entre la audiencia
- *Medea* (1967), música escénica sobre textos de Séneca, para coro masculino tocando ritmos con címbalos y 5 músicos

²⁶ "La crise de la musique sérielle", *Gravesaner Blätter*, nº 1, de julio de 1956.

²⁷ "Vers une métamusique", *La Nef*, nº 29, 1967.

- *Nomos Alpha* (1966), para violonchelo solista
- *Polytope de Montréal* (1967), espectáculo de luz y sonido para 4 orquestas idénticas de 15 músicos
- *Nuits* (1967), sobre fonemas sumerios, asirios, aqueos y otros, para 12 voces mixtas solistas o coro mixto
- *Nomos Gamma* (1967-1968), para 98 músicos dispersados entre la audiencia
- *Anaktoria* (1969), para conjunto de 8 músicos
- *Kraanerg* (1968-1969), música para ballet, para orquesta y cinta magnética de 4 canales
- *Persephassa* (1969), para 6 percusionistas
- *Persepolis* (1971), para luz y sonido (cinta magnética de 8 canales)
- *Cendrées* (1973), para coro mixto de 72 (o 36) cantantes entonando fonemas de Iannis Xenakis y 73 músicos
- *N'Shima* (1975), sobre palabras y fonemas hebreos, para 2 mezzo-sopranos (o altos) y 5 músicos
- *Jonchaies* (1977), para orquesta de 109 músicos
- *Pléiades* (1978), para 6 percusionistas
- *Shaar* (1983), para gran orquesta de cuerda
- *Jalons* (1986), para conjunto de 15 músicos
- *Keqrops* (1986), para piano solista y orquesta de 92 músicos
- *Kassandra (Oresteia II)* (1987), para barítono amplificado (también tocando un salterio de 20 cuerdas) y percusión
- *La Déesse Athéna (Oresteia III)* (1992), para barítono solista y conjunto mixto de 11 instrumentos

3.8 Linda Long

La doctora e investigadora británica Linda Long ha conseguido transformar la estructura molecular de las proteínas de plantas como el perejil, el tomillo o el romero en composiciones musicales demostrando así que cada planta tiene su propia melodía preprogramada.

Este descubrimiento podría utilizarse con fines terapéuticos. De ahí que su objetivo ahora sea traducir a música la secuencia de las proteínas de los órganos humanos para permitirnos conocer cómo suena cada uno de ellos y nosotros mismos en conjunto.

De la música participan no sólo los seres humanos sino las demás especies: los pájaros hacen música, las serpientes se sienten hechizadas por ella, las ballenas y delfines la utilizan para comunicarse y ahora, además, una investigadora y compositora británica llamada Linda Long ha descubierto que cada planta tiene su propia melodía programada en sus proteínas. La doctora Long ha logrado grabar un CD de 25 minutos de duración que incluye las melodías de cinco plantas tan comunes como el perejil, el romero, el tomillo, la mostaza o el trébol blanco. Su pretensión es utilizar esta música molecular para curar enfermedades y lograr traducir a música las melodías "*ocultas*" en los órganos humanos.

La música es un lenguaje que posee componentes universales que atraviesan todas las fronteras de edad, sexo, raza, religión y nacionalidad y es una de esas pocas cosas que pueden afectarnos a todos los niveles (físico, mental, espiritual y emocional). Es el idioma más universal pues ha formado parte de la vida del ser humano en todas las culturas desde el principio de los tiempos. De hecho, tenemos muchas más disposiciones musicales de las que imaginamos. Podríamos decir que toda persona es musical, que lo es el mundo que nos rodea e, incluso, el universo en el que estamos inmersos.

En este sentido, cabe mencionar la experiencia de dos profesores de la Universidad de Yale (EE.UU.) quienes, en 1976, aplicando las leyes y anotaciones descubiertas por Kepler (un astrónomo del siglo XVII) y mediante una computadora conectada a un sintetizador musical, consiguieron una grabación de media hora en la que cada planeta del sistema solar generaba una vibración sonora única y que, al ser mezcladas, producían una melodía armónica inigualable.

En el caso que nos ocupa los protagonistas no son los planetas sino las plantas que, según esta investigadora, producen música, una música diferente a cualquier otra y que -tal es su pretensión- podría al parecer ser utilizada con fines terapéuticos.

Otra experiencia similar es la de un pequeño grupo de biólogos y de músicos norteamericanos que desde hace más de 20 años consiguen generar a partir de secuencias genéticas lo que denominan "música del ADN". A este respecto, la doctora Long cree que su "música molecular" va más lejos porque utiliza la estructura tridimensional completa de la molécula y no sólo su secuencia lineal.

3.8.1 La música de las plantas

La doctora Linda Long, licenciada en Bioquímica por la Universidad de Exeter (Gran Bretaña), es además investigadora en medicinas complementarias y lleva años investigando la eficacia de la homeopatía, las hierbas medicinales y la musicoterapia.

Pues bien, tras cinco años de intenso trabajo -reconocido con el Premio a la Invención y la Innovación de la Fundación Británica para la Ciencia, la Tecnología y las Artes- ha conseguido transformar la estructura molecular de las proteínas de plantas comunes en composiciones musicales y, así, ha descubierto que plantas como el perejil, la salvia, el romero o el tomillo -entre otras- tienen su propia melodía preprogramada.

El premio le ha sido concedido para que desarrolle su trabajo como una herramienta para enseñar y analizar las complejas estructuras biológicas y para hacer música con fines terapéuticos.

"La música molecular -así la define su descubridora- supone un fascinante e innovador vínculo entre los aparentemente dispares mundos de la música y la biología ya que significa generar música a partir de las proteínas y, en concreto, de sus estructuras terciarias (tridimensionales)".

3.8.2 ¿Cómo se hace "música molecular"?

Con la ayuda de un amigo matemático, Linda Long ha diseñado un programa informático que traduce las secuencias de proteínas de cada planta a notas musicales lo que le permite, con un sintetizador, formar melodías completas. Esta doctora -que toca el órgano y compone al tiempo que estudia las proteínas de las plantas para su proyecto de investigación en medicinas complementarias- ha grabado las melodías creadas por las

proteínas del perejil, la mostaza, el trébol blanco, el romero y el tomillo. Según la doctora Long, *"las melodías son específicas de cada proteína. Cada proteína puede dar lugar a una composición musical diferente de forma que si un organismo contiene 100 proteínas pueden producirse 100 composiciones distintas a partir de ese organismo. Las secuencias de notas derivan de las estructuras naturales de proteínas sin manipulación. Yo no tengo control sobre eso. Es música derivada de fuentes naturales que se encuentran en toda forma de vida. Puede considerarse música orgánica"*.

Explica la doctora que cada organismo contiene infinidad de proteínas, compuestas a su vez por un número indefinido de estructuras terciarias o tridimensionales. Cada una de esas estructuras terciarias puede ser cristalizada para su estudio. Esa cristalización se hace con un haz de rayos X con los que se consigue una radiografía de las estructuras tridimensionales de la proteína de la que se quiere extraer la melodía. Después se asigna una nota musical a cada estructura terciaria de la proteína y se introduce la radiografía en el ordenador diseñado por el equipo de trabajo de la doctora Long.

Mediante unos complicados parámetros dados por el matemático, el programa informático irá leyendo la secuencia completa de la proteína y fijará una nota musical para cada estructura terciaria. El ordenador repetirá las notas musicales tantas veces como se repitan las estructuras específicas. De esta forma, a medida que se va descifrando la secuencia completa de la proteína se va produciendo música a través de un sintetizador incorporado al ordenador. Así se compone la melodía concreta de esa proteína determinada. El proceso se repite hasta obtener la melodía de todas las proteínas para obtener la composición musical completa de la planta.

"Las diferencias entre las estructuras de las proteínas son difíciles de detectar cuando se perciben visualmente como un modelo tridimensional pero son mucho más obvias cuando se expresan como música porque los humanos tenemos un oído muy agudo -afirma la doctora Long-. Cuando introduje los datos en el ordenador escuché una secuencia de notas y me di cuenta de que las estructuras de la proteína formaban más una melodía que una sucesión de notas musicales sin orden. Lo que hice fue acompañar lo que había oído con unos arreglos de fondo para complementar la melodía de la proteína".

Esta investigadora espera seguir perfeccionando la tecnología mientras se concentra en su potencial educativo y musical. El *Financial Times* ha definido a Linda Long como *"pionera en una nueva frontera"*

entre el arte y la ciencia" por encontrar el camino para hacer que las proteínas canten. "Aunque no literalmente, por supuesto", añade el diario británico.

Las melodías del tomillo, el romero, el perejil, la mostaza y el trébol blanco han sido ya recogidas en un CD titulado *Música de las plantas* que dura 25 minutos y puede ser escuchado en la página web de la doctora Long (www.molecularmusic.com). Según ella, *"este CD presenta piezas musicales que ofrecen una visión única del reino de las plantas, reino que ha sido fuente de inspiración y salvación para la humanidad desde el amanecer de los tiempos. La música no está limitada por las palabras o por la lógica por lo que puede comunicar con nosotros a niveles más profundos liberándonos para experimentar directamente la esencia de todas las formas de vida y permitiéndonos adentrarnos en la voz de la naturaleza"*.

Sus próximas investigaciones se centrarán en obtener música de las proteínas de diferentes órganos del cuerpo humano pues, según cree, *"toda forma de vida contiene proteínas que pueden ser traducidas al lenguaje de la música. Espero con ilusión poder escuchar cómo suena el cuerpo humano"*.

Si las investigaciones de esta doctora se desarrollan según lo previsto, pronto podremos escuchar la melodía interna, particular y única de cada ser humano, singular forma de saber algo más sobre nosotros mismos.²⁸

²⁸ Artículo "Linda Long: La música orgánica"
Laura Jimeno
Reportajes DISCOVERY DSALUD
http://www.dsalud.com/numero28_1.htm

3.9 Conclusión.

La música automática es una inquietud que no tiene poco tiempo. Esta inquietud ha estado vigente y seguirá estando entre muchos aficionados a la música, compositores profesionales y gente que guste de escucharla. Hay muchos que dicen que la música así generada tiene poco valor estético, y que el compositor en realidad no compone. El trabajo de la composición de este tipo, y ésta es un opinión muy personal, esta en la generación de los procesos matemáticos; ya sea de conocidos fenómenos físicos o ya sea de nuevas investigaciones aplicadas a las matemáticas y a otros campos de investigación, con lo que concluyo que la música así generada fue compuesta por un científico y un músico o un "científico de la música".

Con esto finaliza el trabajo de esta tesis, ahora ya se han visto varias facetas del sonido; como fenómeno físico, como fuente de datos o información a la computadora y desde ella, para que la usemos como una herramienta auxiliar de composición, y como un ente que se procesa en la computadora para producir música basada en reglas que nosotros diseñamos.

Conclusión Final y Propuestas

Las ciencias computacionales se han acercado a muchas disciplinas, en algunas de una forma muy natural, por la necesidad de mejorar los procedimientos y los instrumentos, por ejemplo la medicina. En otros campos la computadora ha ido ganando espacio rápidamente también, por ejemplo en las profesiones económico administrativas, ya que permite una mayor eficiencia en las labores que se realizan. Para el caso de las ciencias sociales también se va ganado terreno al utilizar la computadora como una herramienta indispensable, y de la misma forma lo está haciendo en las artes.

El tema de esta tesis involucra a las computadoras y a la utilidad que éstas tienen para la creación de música, ya sea como herramienta de escritura, de control, de inspiración, etc. las máquinas cada vez hacen más fácil la concepción y/o arreglo de la música. Esto no es una cosa que haya surgido de la noche a la mañana y por ejemplo en el trabajo de la restauración de pinturas se ha dado un fuerte impulso a el uso de las computadoras al notarse la ventajosa situación de trabajar con ellas en trabajos tan complicados como éste. Otras de las bellas artes han incorporado la computación a sus modos de trabajos y en cada una de ellas el resultado es la facilidad de comprensión y de asimilación de los conocimientos relativos a cada una de ellas.

El uso de la tecnología computacional para la creación de música es un trabajo de tesis que agrupa el conocimiento de la creación de música con ayuda de la computadora que se encuentra disperso en muchos textos y que pretende hacer conocer al lector este tipo de tecnologías de una manera sencilla pero eficaz para que trabaje con las herramientas computacionales para crear y también mejorar su música.

Es un trabajo que esta basado en la inquietud de un músico igual que hay muchos más con muchas aspiraciones y con muchas ideas sobre la música y que con ayuda de herramientas como la computadora pueden hacerlas surgir de manera sencilla e incluso se puede innovar en el tema de la música y por supuesto en la ingeniería. La ingeniería también es preciso mencionarla ya que sin ella no se hablaría de esta tesis que involucra tecnologías que se generan a través del estudio de la ciencia y su aplicación en situaciones cotidianas que mejoran la vida del hombre, para este caso la vida de los hombres que se dedican a hacer música.

Bibliografía

- Alkin, Glyin
Grabación y reproducción del sonido
Centro Universitario de Estudios Cinematográficos UNAM 1988
- Bandini, Alberto
Instalaciones electroacústicas
Maracombo 1993
- Beyer, Robert T.
Sound of our Times *Two hundred years of acoustics*
Springer AIP PRESS 1998
- Brandstein, Michael
Microphone Arrays
Springer 2001
- Caballero Cristian
Introducción a la música
EDAMEX 1993

- Chion, Michael
El Sonido
Paidós Comunicación 1999

- Chion, Michael
La Audiovisión
Paidós Comunicación 1998

- Domínguez A. Héctor Y Fierro G. Julieta
Los Sonidos de Nuestro Mundo
Dirección General de divulgación de la Ciencia UNAM 2003

- Espinosa y Montes, Ángel R.
Construcción y elaboración del proyecto de tesis
ENEP Aragón UNAM 1989

- Iglesias Simon, Pablo
Postproducción Digital de Sonido por Computadora
Alfaomega RA-MA 2002

- Lyver, Des
Principios básicos de sonido para video
Editorial Gedisa 2000

- Miles, David
The MIDI manual
SAMS 1990

- Oros Cabello, Juan Carlos
MIDI y MOD Fácil con el PC
Ra – ma 1996

- Penfold R. A.
MIDI Avanzado Guía de usuario
Ra – ma 1993

- Phillips, Dave
Linux Music & Sound
Linux Journal Press No Starch Press 2000

- Reccero López, Manuel
Estudios y Controles para la Grabación Sonora
Instituto Politécnico Nacional México 1991

- Rose, Jay
Producing Great Sound for digital video
CMP Books San Francisco 1999

- Roseburg, Victoria
A guide to Multimedia
New Riders Publishing 1993

- Saad, Antonio Miguel
Redacción
Compañía Editorial Continental S.A. de C.V.

- Strawn, John
Digital Audio Engineering *An Anthology*
William Kaufmann INC. 1985

- Van Well, Markus
La música con el PC
Maracombo 1998

- Zorrilla Arena, Santiago
La Tesis
McGraw Hill 1993

- Laura Jimeno
Artículo "Linda Long: La música orgánica"

Reportajes DISCOVERY DSALUD

http://www.dsalud.com/numero28_1.htm

- http://es.wikipedia.org/wiki/Iannis_Xenakis.htm
- <http://midimath.tucajon.com> Informática, Matemáticas y Música:
La pluma digital Álvaro L. Maroto Conde