

Universidad Nacional Autónoma de México

Escuela Nacional de Música

Programa de Maestría y Doctorado en Música



GUÍA TÍMBRICA DE MÚSICA ELECTRÓNICA A TRAVÉS DE
COMPOSICIÓN DE MINIATURAS MUSICALES

TESIS QUE PARA OBTENER LA MAESTRÍA EN MÚSICA
EN EL ÁREA DE TECNOLOGÍA MUSICAL

PRESENTA:

MARÍA LUISA SOLÓRZANO MARCIAL

TUTOR: DR. FELIPE ORDUÑA BUSTAMANTE

México, D.F. mayo 2010



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

DEDICATORIA

A mi madre, de quien recibí las mejores enseñanzas

A mis hermanas y a mi hermano, quienes siempre me han mostrado, a través de su conocimiento paciencia y cariño, lo afortunada que soy al tenerlos.

A mis sobrinos

A Julia y Marina

AGRADECIMIENTOS

Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM.

Programa de Maestría y Doctorado de la Escuela Nacional de Música. UNAM.

Maestros:

Dr. Felipe Orduña Bustamante

Mtro. Héctor Pablo Silva Treviño

Dr. Manuel Rocha Iturbide

Amigos:

A mis compañeros de generación Gisela Gracida y José Manuel Mondragón por su solidaridad y apoyo

A Gabriela Mendoza y Beatriz Blanco por su presencia siempre

A Dinya Pedraza, Marcela Canedo, Belem Pilar, Jesús Ávila, y Armando Rosas por su alegre compañía.

Índice General

Dedicatoria.....	i
Agradecimientos.....	ii
Índice General	iv
Introducción.....	1
Capítulo 1. Timbre. Fundamentos teóricos y estudios sobresalientes.....	3
1.1. Timbre desde el punto de vista de la música acústica, en su relación con los principios de instrumentación y orquestación.	3
1.2 Teoría Clásica del timbre. Sonido simple y complejo. (Fourier Ohm, Helmholtz)...	
1.3 Banda crítica, Enmascaramiento. (Vequesy, Fletcher, Plomp)	11
1.4 Timbre desde el punto de vista de la distribución de energía espectral. (John Grey).....	17
1.5 Timbre en relación con la afinación y las escalas - curvas de disonancia – timbres alargados y comprimidos. Sethares).....	22
1.6 Modos de vibración (Gareth Loy).....	29
Capítulo 2. Diferentes Tipos de síntesis de Sonido.....	36
2.1 Diferentes clasificaciones de la síntesis de sonido.....	37
2.2 Síntesis lineal y no lineal.....	40
2.3 Fundamentos básicos (osciladores, tabla de ondas, envolventes).....	42
2.4 Síntesis aditiva.....	46
2.5 Síntesis substractiva.....	48
2.6 Síntesis granular.....	51
2.7 Modulación.....	54
2.8 Síntesis por modulación de amplitud (AM).....	56
2.9 Síntesis por modulación de anillo (RM).....	57
2.10 Síntesis por modulación de frecuencia (FM)	59
2.11 Síntesis de voz.....	69
2.12 Otros Tipos de Síntesis de sonido.....	71

Capítulo 3. Materiales Tímbricos en FM en Csound.....	75
3.1 Origen y funcionamiento de Csound.....	75
3.2 Estructura y sintaxis de la orquesta y partitura en Csound.....	76
3.3 Descripción del proceso en la construcción de los materiales tímbricos FM en Csound.....	77
3.4 Modelos de algunos instrumentos FM.....	81
Capítulo 4. Composición de Miniaturas musicales (Logic Pro).....	88
4.1 Luciérnaga.....	90
4.2 Bufón.....	93
4.3 Fiesta de mariposas.....	96
4.4. Loto en flor.....	99
4.5 Corazón.....	101
4.6 Rarámuri.....	103
4.7 Cuenco.....	105
Conclusiones.....	108
Bibliografía.....	112

Introducción

El desarrollo de la tecnología que desde mediados del siglo XX, y de manera más acelerada, durante los últimos 30 años nos ha acompañado, ha conducido a una revolución dentro del campo de la música en general. Su desarrollo sigue avanzando rápidamente, hasta modificar en forma considerable las formas de crear música y consumirla.

Las herramientas que ofrecen los medios electrónicos e informáticos para el ejercicio de la composición musical son múltiples. Existe hoy en día una variedad de software dirigida al músico profesional y al amateur.

En esta introducción presento en forma resumida el contenido de los capítulos que darán forma a mi trabajo de tesis y que pretende ser una guía tímbrica que proporcione un primer acercamiento al conocimiento y práctica de algunas herramientas tecnológicas básicas para la composición musical.

El acercamiento a las herramientas tecnológicas para la composición requiere del conocimiento de conceptos fundamentales, relacionados con la acústica, la psicoacústica, la electrónica y la informática. Su participación simultánea nos permite utilizar dichas herramientas para una visión creativa de la música.

Entre las herramientas que ha proporcionado la tecnología al ejercicio de la composición musical se encuentran la manipulación del timbre y la movilidad del sonido en el espacio.

El timbre de los sonidos es una de las características más ricas e interesantes del sonido en el ámbito de la música; la posibilidad de su modificación a través de la tecnología ha aportado a la construcción de nuevos lenguajes musicales en el mundo.

Lo central de mi trabajo es crear y transformar timbres que me sirvan de material en la composición de miniaturas musicales. Por tanto, me interesa especialmente conocer los procedimientos para su modificación. Previamente es necesario revisar y reflexionar sobre diferentes definiciones, teorías y estudios existentes que, desde diferentes enfoques, han abordado la fenomenología del timbre. Esta revisión será expuesta en el capítulo 1.

Existen formas de construir sonidos y sus timbres; también pueden ser modificados ya habiendo sido grabados o en vivo, es decir en tiempo real. Una importante fuente para realizar esto son los diferentes tipos de síntesis del sonido. En el capítulo 2 desarrollo las características fundamentales de algunos tipos de síntesis. Sólo me refiero a los tipos de síntesis más accesibles y conocidos, dejando de lado, por ahora, el procesamiento de señales, campo íntimamente relacionado con la ingeniería del sonido.

El capítulo 3 describe los modelos de síntesis de frecuencia modulada (FM) que ofrece el programa Csound, y que fueron utilizados para la producción de diferentes timbres. Entre éstos se destacan aquellos que fueron seleccionados para su uso como material en la composición de 7 miniaturas musicales.

Los timbres utilizados en éste capítulo, ya sea en forma de texto (Apéndice 1) o de audio han sido grabados en CD anexo a este trabajo.

El capítulo 4 describe la potencialidad sonora de los materiales tímbricos con los que fueron compuestas las 7 miniaturas musicales. De igual forma se muestra, a través de tablas, las características formales que posee cada una de ellas.

Los archivos de audio correspondientes a las Miniaturas musicales, también se encuentran grabadas en el CD anexo.

Capítulo 1. Timbre. Fundamentos teóricos y estudios sobresalientes.

Existen diversas definiciones del término *timbre*, dependiendo del área de conocimiento y de los diferentes enfoques, desde los cuales haya sido abordado.

Para conocer las características de la percepción del timbre, en el ámbito de la composición musical, se necesita estudiarlo a través de diversas vías de conocimiento, como pueden ser la instrumentación y la orquestación, las cuales a su vez se apoyan en principios de la acústica y la psicoacústica. De otro modo, para la manipulación y uso del timbre, es necesario conocer las abundantes herramientas y nuevas posibilidades que han aportado las tecnologías electrónica e informática en su estudio.

La tecnología, a través del análisis y la síntesis analógica y/o digital del sonido, ha logrado acercarse al microespacio en que se relacionan los parámetros que componen el timbre. Pudiendo generar sonidos originales o primarios y nuevos timbres para ser usados musicalmente.

¿Cuáles son los factores o parámetros físicos que determinan el timbre de los sonidos musicales o no? ¿Qué es el timbre?

A partir de la segunda mitad del siglo XIX diversos investigadores, no necesariamente músicos, se han dado a la tarea de dar respuesta a las anteriores preguntas. En este capítulo se expone una revisión de los resultados de algunos de estas aportaciones teóricas y estudios que complementariamente forman la investigación que sobre los determinantes del timbre se ha realizado hasta ahora.

1.1. Timbre desde el punto de vista de la música acústica, en su relación con los principios de instrumentación y orquestación.

El timbre es la característica perceptual que marca la diferencia que existe entre sonidos similares, emitidos por distintos instrumentos.

El timbre de los instrumentos musicales varía de acuerdo al material físico que conforma el instrumento, la técnica y calidad en la construcción del mismo, el medio de propagación, la

forma de producción del sonido e incluso, de las técnicas de grabación y de reproducción.

La instrumentación y la orquestación representan, dentro del ejercicio de la composición musical, la construcción y el manejo del *color*, es decir, la parte de la composición en donde el parámetro variado es el timbre. Así, cada uno de los instrumentos tiene por sí mismo, posibilidades tímbricas diversas, esto depende de los registros grave, medio, agudo o sobreagudo. La orquestación también presupone el concepto de balance, pues cada instrumento tiene características distintas con respecto a sus posibilidades de intensidad.

En forma más detallada, la instrumentación se refiere a la posibilidad de adaptar composiciones musicales para un instrumento o agrupación musical. Para ello se requiere de la habilidad para tomar en cuenta las propiedades específicas del instrumento: el timbre, el rango de alturas (frecuencias); el rango dinámico del instrumento y los tonos disponibles en esos rangos, la aplicación de acordes o multifónicos, ciertas clases de ejecuciones que pueden ser especialmente fáciles o difíciles de realizar, técnicas de ejecución como límites de respiración, toque, etc. Efectos especiales como armónicos, pizzicato, glissando, entre otros, en general convenciones de notación para el instrumento.

Por su lado el estudio de la orquestación proporciona herramientas, conocimientos y destrezas que permiten abordar las diferentes familias de la orquesta por separado y en su conjunto, la orquesta completa. La resolución de problemas técnicos en la orquestación para gran orquesta se basa en un criterio fundamentado en las posibilidades técnicas de las familias instrumentales.

La noción del timbre, tiene hoy una consideración mucho mayor que la que anteriormente tenía. *En la Edad Media y en el Renacimiento y aún en el Barroco y Clasicismo, los instrumentos se elegían, por así decirlo, en segunda instancia. La primera instancia ha sido siempre la construcción sucesiva y simultánea, de un sistema formal de relaciones de altura. Después ha venido el instrumento. El condicionamiento instrumental ha incidido en factores como el registro, la altura absoluta o la tonalidad; pero no sobre el sistema mismo de relaciones.* (Piston, 1984)

Gran parte de la música medieval o renacentista es imprecisa en cuanto al instrumental, o permite una variedad de elecciones, las cuales se expresan bajo rúbricas tales como “instrumentos de tecla” u otras. *Esta practica persiste durante los siglos XVII y XVIII. la construcción del arte de la fuga de Bach es abstracta en este sentido y Haendel alternaba flauta y violín en las sonatas, Haydn y Mozart utilizan a veces los grupos, conformándose numérica e incluso cualitativamente con lo que tenían a la mano. El bajo continuo podía ser ejecutado por varios instrumentos.* (Piston, 1984). Específicamente de tecla o cuerda punteada.

Cada época tuvo ideas de exploración tímbrica distintas, y desde la época clásica hasta la romántica, el tamaño y diversidad de la orquesta fue incrementándose.

El nacionalismo, a mediados del siglo XIX, generó en Rusia con el grupo de los cinco, una vitalidad que dio a la música de ese país, una proyección que se extendió hasta la brillante orquesta rusa del siglo XX.

La coloración orquestal de la música rusa, tan distinta a las mixturas occidentales, es un factor decisivo que influirá más adelante, en el concepto instrumental del impresionismo francés.

Los compositores Héctor Berlioz en 1830 y Rimsky Korsakov en 1880, ofrecen importantes tratados de orquestación, donde explican las características técnicas de los instrumentos, así como su simbolismo psicológico. El timbre es algo así como el refuerzo sensorial expresivo del sistema de alturas y de dinámicas, En estos tratados y otros posteriores, nos hablan del carácter o ethos de los instrumentos y de sus respectivos registros, señalando así su carácter dramático.

Los compositores Richard Wagner, Gustav Mahler, y Richard Strauss, representan el romanticismo alemán. En general el mundo musical germánico de esta época, potencia las formaciones orquestales de enormes dimensiones, en las que la familia de metales afianza su posición.

Es durante el siglo XX, cuando los compositores se vuelcan con mayor determinación a la exploración tímbrica del sonido en sí mismo. Un ejemplo se tiene con Ravel en el *Bolero*

(1928) y en su orquestación de los *Cuadros de una exposición* de Mussorgsky (1922). Claude Debussy significa un gran paso en el despertar por la exploración tímbrica: *sólo a Debussy podemos situarlo junto a Anton Webern en una misma tendencia a... recurrir a la belleza del sonido por sí mismo, en una misma pulverización elíptica del lenguaje... las búsquedas de timbre modifican profundamente la escritura, las combinaciones instrumentales, la sonoridad de la orquesta.* (Boulez, 1966).

En su *Tratado de Armonía*, (Schönberg, 1974), presenta la idea que él califica de ciencia ficción: la *Klangfarbenmelodie*, o melodía de timbres. *cambio continuo del timbre, aplicado a la dimensión horizontal de la música* (Boulez, 1966). Dicha idea corresponde al empleo que del timbre hace en la pieza *Farben mässig* (colores) de las *Fünf Orchesterstücke, Op. 16*, (Cinco piezas para orquesta) 1909.

Schönberg no sólo se refiere a la melodía de timbres sino a la consideración del sonido o complejo total sonoro, *Klang* como una concreción indisoluble de altura, dinámica y timbre.

Schönberg, Berg y Webern, conformaron lo que se denominó la Segunda Escuela de Viena, y junto al gran aporte de la emancipación musical de la tonalidad, sobrevino una mayor conciencia de la composición como búsqueda del timbre en sí mismo.

El serialismo integral llevó a compositores como Boulez y Stockhausen a serializar todos los parámetros de la música: altura, intensidad e incluso timbre.

Entre 1910 y 1940, aparece el movimiento italiano de los futuristas así como sus exploraciones respecto al arte del ruido.

Nosotros los futuristas debemos sustituir la limitada variedad de los timbres de los instrumentos de orquesta actual por la infinita variedad de los timbres que existen en los sonidos reproducidos por los mecanismos apropiados. (Morgan, 1994). Citado por Gómez et al, 1977.

Los futuristas fueron los primeros en *conquistar la infinita variedad de ruidos-sonidos...* (Gómez et al, 1977)

Desde entonces, esa preocupación ha permanecido en el interés de algunos compositores.

El siglo XX, permitió investigar y profundizar en la esencia del timbre; su especulación le llevó a proponer aspectos inhabituales en la manera de tratar los instrumentos musicales tradicionales: la inserción de objetos en la parte superior de las cuerdas de un piano; el trémolo labial *frullato* o *flatterzunge* y los multifónicos en los instrumentos de viento; el uso cada vez más abundante de recursos que ya se venían usando anteriormente: una variedad de pizzicattos, entre ellos el inventado por Bartok, los armónicos, col legno, sul tasto y sul ponticello en las cuerdas frotadas, etc. Poco a poco se ha conseguido una sonoridad característica del siglo XX, con una cantidad importante de recursos que amplifican y prolongan los medios tradicionales.

El jazz, ha sido uno de los fenómenos más revolucionarios; *una trompeta o un trombón en labios de un virtuoso del jazz nada tiene que ver con la utilización que el pasado había hecho de estos instrumentos.* (Gómez et al, 1977) Stravinski aprovechó estas perspectivas y las incorporó a sus producciones.

Stravinski, utilizó una escritura orquestal efectiva en su trazo virtuosístico. Se nombran como ejemplo, *Petrushka* (1911) *La consagración de la primavera* (1913) y *El pájaro de fuego* (1910) o, la reducida elección instrumental de *La historia del soldado*, en la que intervienen un instrumento agudo y uno grave de cada familia: un violín y un contrabajo, un cornetín y un trombón, un clarinete y un fagot, todo ello acompañado de un rico despliegue de la percusión.

En sus obras, Bela Bartók es explícito hasta en los más insignificantes detalles, como la distribución de los ejecutantes, la colocación de los instrumentos de percusión, etcétera. De aquí al concepto de sonido estereofónico o relieve espacial sólo hay un paso. (Gómez et al, 1977)

En gran parte de las obras del siglo XX, se ha concedido atención de forma cada vez más importante a la familia de la percusión, la cual, al ampliar las relaciones disonantes o la liberación de las relaciones armónicas tradicionales, junto con la indeterminación sonora, ha ido encontrando un mundo que le ha permitido, amplificar su gama de timbres como una prolongación necesaria y lógica de la creciente evolución tímbrica de la orquesta.

La percusión obtiene mayor preponderancia y autonomía ante la orquesta, ya que se escriben obras especialmente para conjuntos de percusión sola. *Ionisation para orquesta de percusión* (Edgar Varese, 1931); *Ritmicas* (Amadeo Roldan, 1930)

En cuanto a la particular preocupación por el hecho tímbrico en el siglo pasado, se puede nombrar como ejemplos, el piano preparado de John Cage, la invención de instrumentos como las ondas Martenot y el Theremin; la aparición de libros y tratados que exponen las nuevas técnicas, las técnicas extendidas de los instrumentos. Libros como *The Other Flute* de Robert Dick (1989), o *New directions for clarinet* de Phillip Rehfeldt (2003), los cuales incentivan al ejecutante en diversas posibilidades tímbricas.

Por técnicas extendidas entonces, se entiende a aquellas cualesquiera de un número de métodos de ejecución en un instrumento musical que son únicos, innovadores, y considerados a veces como incorrectos, mientras que los instrumentos preparados, son aquellos instrumentos musicales ordinarios, adaptados de diversas formas o con diferentes materiales. Ambos aspectos se realizan para modificar o alterar las características acústicas naturales de los instrumentos, produciendo timbres no comunes a ellos.

La música electrónica, generó un pensamiento de composición para orquesta, donde se propone una aproximación a la composición del sonido electrónico; pero usando las posibilidades que ofrecen las técnicas extendidas y el perfeccionamiento de los instrumentos tradicionales.

Aparecen también, obras donde la noción de tiempo métrico (compás), se disuelve como en la música aleatoria, o en la llamada música textural, donde el interés se centra en estructuras tímbricas, como es el caso de las obras: *Treno por las víctimas de Hiroshima* y *Fluorescencias para Orquesta* de Penderecki, así como en obras de Ligeti: *Atmósferas para Orquesta* y *Requiem para Coro y Orquesta*. Algunas de estas obras no están escritas con compás, lo que muestra un mayor interés en nuevas concepciones del tempo y del ritmo así como en parámetros como el timbre. En Ligeti, hay escritura medida; pero el resultado es una masa sonora indistinguible individualmente, se percibe más bien el conjunto tímbrico. Se menciona como obra cumbre en la búsqueda tímbrica del siglo XX a la obra *Gruppen* de Stockhausen para tres orquestas sinfónicas que se superponen.

El estudio acústico que el laboratorio ha permitido hacer sobre el sonido en cuanto hecho físico, la visualización de las ondas, la manipulación directa en la cinta magnética del espectro tímbrico y la posible descomposición de la superposición de ondas en curvas simples senoidales, ha abierto un campo de conocimiento que permite realizar una nueva composición del sonido y de la música.

1.2 Teoría clásica del timbre. Sonido simple y complejo (Fourier – Ohm - Helmholtz)

Esta teoría se apoya en las aportaciones de los físicos y matemáticos: Jean Baptiste Fourier y Georg Simon Ohm

Jean Baptiste Fourier, (1768-1830), en 1807, establece que cualquier onda periódica puede ser representada por una serie de sumas trigonométricas en senos y cosenos relacionadas armónicamente; es decir, puede ser expresada como un único grupo de sinusoidales caracterizadas, cada una de ellas por 3 parámetros: frecuencia, amplitud y fase relativa a la fundamental.

Fourier obtuvo también, una representación para señales no periódicas, como integrales de senoides, las cuales no todas están relacionadas armónicamente.

Fourier demostró que una señal periódica o no, puede ser descrita ya sea por el patrón de su amplitud sobre el tiempo (por su forma de onda) o por su distribución de energía sobre la frecuencia (por su espectro) y que cualquier forma de esta doble representación es suficiente para describir una señal completamente.

A partir de las series de Fourier, la integral de Fourier, llamada Transformada de Fourier, permite obtener el espectro de un sonido a partir de su forma de onda. En la actualidad es una de las herramientas más poderosas para el análisis de sistemas LTI (Sistema Lineal Invariable en el Tiempo).

La Transformada Discreta de Fourier (DFT) es una técnica computacional que ejecuta la transformada de Fourier en una señal digital. Este método es computacionalmente costoso. Pues requiere un gran número de operaciones aritméticas.

En 1965, Cooley y Tukey, lograron reducir el número de operaciones significativamente.

A este algoritmo se le conoce como Transformada Rápida de Fourier (FFT). Por tanto, FFT (Fast Fourier Transform) es el algoritmo que permite calcular de manera computacionalmente eficiente, la Transformada de Fourier Discreta (DFT) y su inversa.

Georg Simon Ohm (1787-1854).

Propone una explicación de las sensaciones timbricas.

Ley de Ohm (acústica): *el oído analiza las ondas complejas que sobre él inciden, descomponiéndolas en sus componentes sinusoidales, comportándose como si estuviera constituido por una multitud de resonadores, cada uno de los cuales resuena para un sonido simple determinado.* (Olazábal, 1954)

Hermann Ludwig Ferdinand Von Helmholtz (1821-1894).

Helmholtz confirma la ley acústica de Ohm diciendo: *Las diferencias de timbre de los sonidos, provienen únicamente de la presencia de armónicos y de su intensidad relativa.*

(Olazábal, 1954). Helmholtz y Ohm sostenían que la fase de los diferentes armónicos no influye en el timbre complejo. Este aspecto de su teoría ya ha sido rebasado por estudios más recientes. En su aspecto fisiológico las teorías de Helmholtz y Ohm suponen que las fibras de la membrana basilar y los órganos de Corti desempeñan el papel de resonadores para los sonidos simples.

La teoría de Helmholtz, no explica fenómenos de tipo auditivo, como los batimientos y el enmascaramiento.

Helmholtz concluye que para caracterizar el timbre, es mejor analizar su espectro, propone una definición de timbre limitada al estado estacionario o estable (fragmento de duración sostenida) de un sonido. De acuerdo a su interpretación, el timbre está basado principalmente en la estructura armónica de sus componentes de frecuencia. Caracterizó los sonidos con una envolvente de amplitud de tres partes: ataque, estado de estabilidad y decaimiento.

Helmholtz ofrece una explicación fisiológica para la consonancia basada en el fenómeno de los batimientos y de la aspereza.

Si se hacen sonar dos tonos en casi la misma frecuencia, entonces ocurre un batir distinto, el cual se debe a la interferencia entre los dos tonos. El batir se vuelve más lento, mientras que los dos tonos se acercan y desaparece completamente cuando las frecuencias son idénticas. Típicamente, los batidos lentos son percibidos como un vibrato agradable, mientras que los batidos rápidos tienden a ser ásperos y molestos. (Sethares, 2009)

Helmholtz teorizó que la disonancia entre dos tonos es causada por el rápido batir de varios componentes de onda de seno. La consonancia, de acuerdo con Helmholtz, es la ausencia de tales batidos disonantes. (Sethares, 2009)

1.3 Banda crítica, Enmascaramiento. (Bekesy, Fletcher, Plomp)

George Von Bekesy (1899-1972).

Los experimentos de Bekesy confirmaron y aclararon la teoría resonante de Helmholtz, de distribución tonotópica de los terminales del nervio auditivo, a lo largo de la Membrana Basilar, formando a modo de un teclado de notas que resuenan a distintas frecuencias, desde las altas en las proximidades de la ventana oval, hasta las bajas conforme se aproxima el ápice. El oído interno actúa como un analizador de Fourier que responde a las componentes tonales de las señales sonoras. Los desplazamientos verticales del órgano de Corti, establecen rozamiento con la Membrana Tectorial, protuberancia gelatinosa que se apoya de forma mecánicamente independiente sobre los terminales ciliados del órgano de Corti, generando impulsos eléctricos neuronales que codificados son transmitidos por el nervio auditivo. (Lara Sáenz, 2005)

Harvey Fletcher (1884-1981). En 1934 define al timbre como la característica de la sensación que permite al oyente escuchar el tipo de instrumento que emite el sonido.

Una forma de entender el funcionamiento del sistema auditivo es suponer que contiene una serie o banco de filtros pasa banda traslapados conocidos como filtros auditivos. (Fletcher, 1940 citado en Moore, 1990). (Cádiz 2008)

Estos filtros se producen a lo largo de la membrana basilar y tienen como función aumentar la resolución de frecuencia de la cóclea y así incrementar la habilidad de discriminar entre distintos sonidos. Este banco de filtros no sigue una configuración lineal, y el ancho de banda y morfología de cada filtro depende de su frecuencia central. El ancho de banda de cada filtro auditivo se denomina banda crítica (Fletcher (1940) citado en (Gelfand, 2001). (Cádiz 2008)

Dos sonidos puros crearán la sensación de un batimento hasta que la diferencia exceda entre los 10 y 15 Hz. El punto en el que dos frecuencias es suficiente para apreciarlos como dos sonidos diferentes se conoce como límite de discriminación. Al separarse, justo fuera del rango de batimentos existen una región denominada aspereza tonal.

Este término está asociado con la banda crítica que corresponde al punto en donde sonidos son discriminados. De acuerdo a esta teoría, cuando el oído recibe dos sonidos cercanos en frecuencia existe una sobreposición de las neuronas estimuladas en la membrana basilar. La diferencia en frecuencia entre los tonos en donde la sensación de aspereza cambia a una sensación de suavidad se conoce como banda crítica. (Zwicker, 1957)

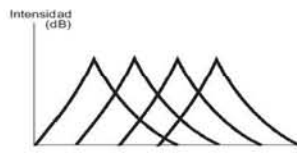


Figura 1. Esquema de las bandas críticas del sistema auditivo humano (Cádiz 2008)

Las bandas críticas conceptualmente están ligadas a lo que sucede en la membrana basilar, ya que una onda que estimula la membrana basilar perturba la membrana dentro de una área pequeña más allá del punto del primer contacto, excitando a los nervios de toda el área vecina; por lo tanto las frecuencias cercanas a la frecuencia original tienen mucho efecto sobre la sensación de intensidad del sonido. La intensidad percibida no es afectada, en cambio, por la presencia de sonidos fuera de la banda crítica. Es necesario destacar que el concepto de banda crítica es una construcción teórica y no algo físicamente manifestado.

Las sensaciones de batimiento y aspereza son fluctuaciones de amplitud que ocurren debido a la interferencia constructiva y destructiva de las ondas sonoras. El término *aspereza* es análogo a sensaciones táctiles en el sentido de pequeñas irregularidades en la percepción del sonido. La rapidez de las fluctuaciones de amplitud que forman dos ondas que se superponen es igual a su diferencia en Hz. Ondas cuya diferencia de frecuencia es menor a 20Hz producen fluctuaciones lentas que se perciben como trémolo o batimientos. Fluctuaciones más rápidas son las responsables de las sensaciones de aspereza. *Las diferencias de frecuencia (o intervalos musicales) que producen mayor sensación de aspereza varían con el registro de la escucha. Esta variación está en función de la fisiología de la cóclea y se llama la banda crítica.* (Lach Lau, 2008)

Plomp R y Levelt. WJM, examinaron consonancias de manera experimental, generando pares de ondas seno y pidiéndoles a voluntarios que los evaluaran en términos de su consonancia relativa. A pesar de la considerable variabilidad entre las respuestas, hubo una tendencia simple y clara. Al unísono la consonancia fue máxima. Mientras se incrementaba el intervalo, este fue considerado cada vez menos consonante, hasta que a un cierto punto, se alcanzó un mínimo. Después de esto, la consonancia se incrementó, pero sin alcanzar propiamente, la consonancia del unísono. Plomp y Levelt le llamaron a esto *consonancia tonal o sensorial*, para distinguirla de la *consonancia musical de la teoría del batido de Helmholtz*. (Sethares, 2009)

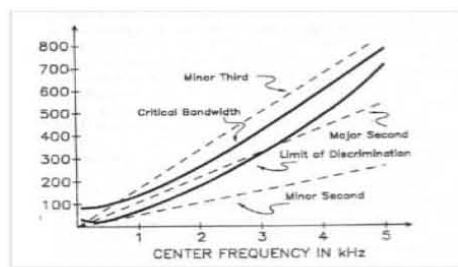


Figura 2. Las anchuras de las bandas críticas de la figura, son intervalos de frecuencia dentro de las cuales un sonido enmascara la percepción de otro. (Roederer, 1995)

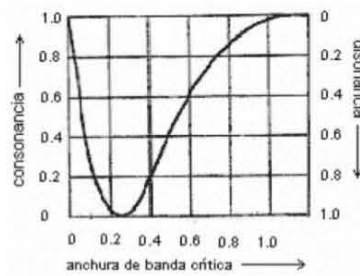


Figura 3. Curva de consonancia en pares de tonos puros (Plomp y Levelt, 1965).

Con los datos obtenidos de esta gráfica, Plomp y Levelt (1965) elaboran otra de forma numérica en la que se representa la diferencia entre dos sonidos complejos frente a la disonancia. Dejando un sonido fijo (250Hz) varían el segundo desde el unísono hasta su octava. La disonancia que se produce entre los sonidos complejos, formados por los 6 primeros armónicos, se obtiene formando pares entre las frecuencias próximas de los diferentes armónicos que se encuentran dentro del ancho de banda crítica correspondiente a este intervalo.

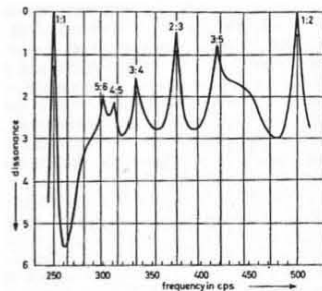


Figura 4. Disonancia frente a relaciones de frecuencia de dos sonidos simultáneos. (Plomp y Levelt 1965).

En 1965, Plomp y Levelt llegaron a la conclusión que la consonancia o disonancia depende más de la diferencia entre frecuencias que de sus razones. (frecuencia relativa o cociente de frecuencias) Si la diferencia de frecuencia entre dos tonos es mayor que una

banda crítica, suenan consonantes, si es menor, suenan disonantes. Esto se conoce como disonancia tonotópica. Kameoka y Kuriyagowa también en 1965 encontraron que la máxima disonancia ocurre cuando la diferencia de frecuencia es aproximadamente un cuarto de la banda crítica. (Fernández-Herrero y Lorente, 2006)

Los experimentos realizados por Plomp revelan que el intervalo más disonante entre tonos puros, es aquel en el que las frecuencias de los dos tonos puros están separadas un 25 % de la banda crítica. El ancho de banda crítica varía de acuerdo a la frecuencia central, siendo casi constante a frecuencias inferiores a 500 Hz y proporcional a la frecuencia central por encima de 500 Hz.

El hecho de que la banda crítica sea un intervalo mayor en las frecuencias bajas puede explicar el uso de intervalos más grandes en los registros bajos en la música. El ancho de la banda crítica juega un papel importante en la percepción de la intensidad y el timbre.

Terhardt (1974) basándose en las teorías de Helmholtz, propone un acercamiento a la consonancia musical. Para él, uno de los aspectos generales de la percepción de los sonidos, es la diferencia entre altura espectral y altura virtual.

El tono de un sonido puro, es un ejemplo de altura espectral, mientras que el tono de un sonido complejo es un ejemplo de altura virtual. Hay por tanto dos modos de percepción del sonido: un modo analítico, resultado de la altura espectral y otro sintético, resultado de la altura virtual.

Jean-Claude Risset (1938), utilizó el software digital (Mathew Música IV) para recrear los sonidos de instrumentos de metal, hizo grabaciones de trompetas y estudió su composición tímbrica. Utilizando como herramienta de análisis del espectro, *el tono sincrónico*, reveló que los armónicos de estos instrumentos son diferentes, dependiendo de su altura, duración y sonoridad.

Resultados experimentales sugieren que otras dimensiones físicas, tales como la amplitud y fase de los patrones de los componentes y, en particular, las características temporales de tono, pueden influir en la percepción del timbre. (Berger, 1964 ; Schouten, 1968; Balzano, 1986). Citado en Samson, et al, 1993).

Actualmente es un consenso que el timbre musical es una propiedad multidimensional del sonido. Los principales factores determinantes de nuestra percepción del timbre son proporcionados por la energía espectral y la variación temporal de los tonos musicales, según lo sugerido por los resultados psicoacústicos de varias investigaciones con respecto a la dependencia del timbre sobre el patrón espectral de amplitud: (Plomp, 1970); (Wessel, 1973); (Miller y Carterette, 1975); (Grey, 1977); (Grey y Gordon, 1978); (Wessel, 1979); (Grey y Gordon, 1993. Citado en Samson, et al, 1993).

Sin embargo, pocos estudios han demostrado la importancia del tiempo sobre la percepción del timbre (Grey, 1977; Wessel, 1979; Krimphoff et al., 1994; McAdams 1995; Cunible, 1992; McAdams et al., 1995). En un estudio reciente (Samson et al., 1997), ha logrado demostrar, la dependencia del timbre con las envolventes espectrales y la temporalidad de tonos. . Citado en Samson, et al, 1993).

La figura a continuación muestra como cada parcial avanza independientemente de la amplitud en el tiempo. Tres dimensiones: 1. Tiempo, 2. Amplitud y 3. Número de parcial. El gráfico muestra los primeros 5 segundos del tono de una trompeta.

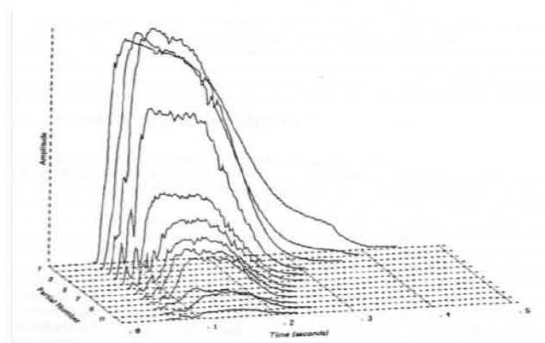


Figura 5. Amplitud, frecuencia y tiempo de un tono de una trompeta. Se muestra la forma en que el parcial de frecuencia más baja (fundamental), aparece en primer lugar y es el componente más sonoro. También es el último en decaer.

La psicoacústica moderna (J.C. Risset, 1977) obliga a considerar dos tipos de altura: la altura tonal (que corresponde al concepto familiar de altura) y la altura espectral que va

unida al impacto de los armónicos presentes. Haciendo variar por ordenador estos dos parámetros en sentido inverso, se llegan a producir ilusiones sonoras paradójicas: sonido que parece subir o descender siempre (se reproduce así sobre el plano sonoro una forma de escalera de Escher).

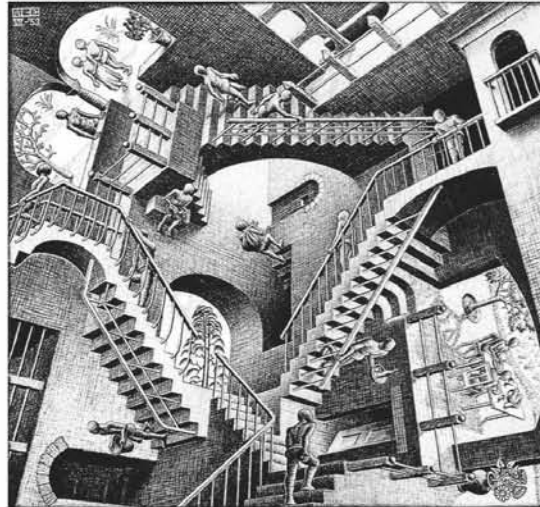


Figura 6. Relativitat, Maurits Cornelis Escher, 1953 litografía.

De hecho, no somos iguales ante este fenómeno: el oído de algunos se muestra más sensible a la altura espectral, el de otros a la altura tonal. Se sabe gracias a J.C. Risset y Charboneau, que el oído derecho percibe mejor las melodías tonales mientras que el oído izquierdo es más hábil para seguir las melodías espectrales. (Bernard 1988).

1.4 Timbre desde el punto de vista de distribución de energía espectral (John Grey)

La investigación perceptual sobre el timbre ha demostrado que la distribución de la energía espectral y la variación temporal de esta distribución, provee los determinantes acústicos de nuestra percepción de la calidad sonora. (John Grey. 1975).

John Grey realiza experimentos controlados para determinar si es posible discriminar entre dos tipos de envolvente . Usó 16 sonidos de instrumentos orquestales sintetizados y un

grupo de 8 de instrumentos híbridos producidos intercambiando envolventes espectrales entre los miembros del primer grupo.

Estos sonidos fueron sintetizados usando envolventes de segmentos de recta y ecualizados subjetivamente en altura, sonoridad y duración.

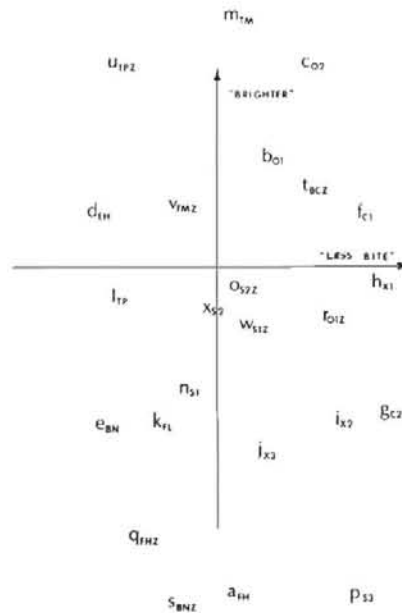


Figura 7. Representación bidimensional de 24 sonidos pseudo instrumentales. (Grey 1975).

Una de las técnicas más generales es representar las disimilitudes perceptuales como distancias en una configuración espacial.

Se comienza con juicios de diferencias entre todos los pares de sonidos tomados del conjunto. Esta matriz de diferencias luego se procesa con un programa de escalamiento multidimensional, KYST (Kruskal, 1964). El programa produce una matriz espacial de N dimensiones con puntos que representan a los objetos sonoros.

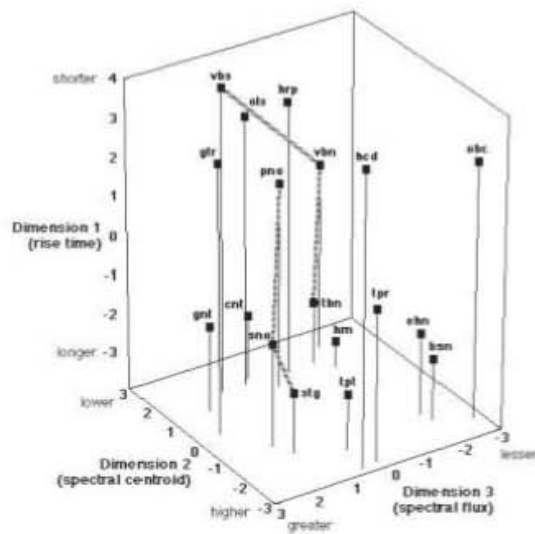


Figura 8 Conjunto de sonidos usados por Grey (Grey. 1975); (Grey y Gordon.1978)
Tomado de McAdams, S. et al. Psychological Research, 58, 177-192 (1995)

En varios estudios sobre espacios tímbricos (Wedin y Goude . 1972; Wessel. 1973; Grey. 1975; Ehresman y Wessel. 1978; Grey y Gordo. 1978; Wessel y Grey. 1978) aparece esta dimensión relativa a la distribución de la energía espectral. (McAdams, S. Et al, 1995).

El promedio de la distribución de la energía espectral compensada es luego calculada y correlacionada con las proyecciones de los puntos sobre el eje relativo al brillo. En todos estos estudios estas correlaciones han sido muy altas. (McAdams, S. Et al, 1995).

Grey especifica las distancias relativas entre puntos de datos, examina los datos en tres dimensiones, en todas sus rotaciones posibles y finalmente decide, cuál conjunto específico de características tridimensionales, ofrece las mejores posibilidades para la explicación de las diferencias del timbre.

Las mayúsculas identifican los sonidos.

Abreviaturas : O1 = oboe; O2 = oboe diferente; FH = corno francés; BN = fagot; C1 = clarinete en mib; C2 = clarinete bajo en Mib; FL = flauta; X1 = saxofón interpretado mf; X2 = saxofón, interpretado p; X3 = saxofón soprano; TP = trompeta Mib; EH = corno inglés; S1 = cello con sordina sul ponticello; S2 = cello normal; S3 = cello con sordina sul tasto; TM = Trombón con sordina; FHZ = FH modificado en su envolvente espectral; BNZ = BN modificado; S1Z = S1 modificado con envolvente espectral de S2; S2Z = S2 modificado con S1; TMZ = TM modificado con TP; BCZ = C2 modificado con O1; O1Z = O1 modificado con C2.

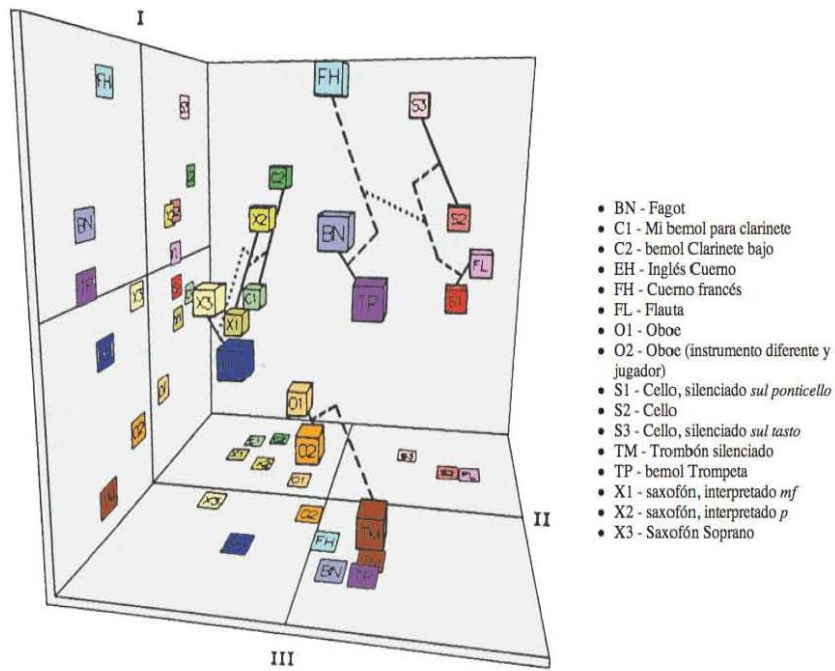


Figura 9. Dimensión I: distribución espectral de energía, desde lo más ancho a lo más estrecho (alto o bajo)

Dimensión II: el momento del ataque y decaimiento, sincrónico a asincrónico

Dimensión III: cantidad de inarmónicos del sonido en el ataque, de mayor a ninguno (Grey, 1979)

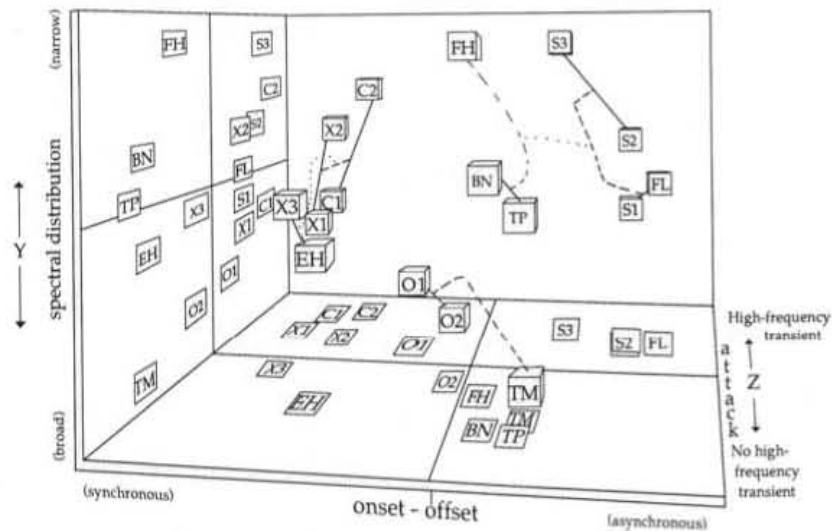


Figura 10. El eje vertical refleja la distribución de la energía espectral de los sonidos, y el horizontal la naturaleza del transiente de ataque. Grey (1975) (John R. Pierce, 1983)

En su libro *Musimathics: The Mathematical Foundations of Music*, 2006. Gareth Loy presenta de manera detallada las conclusiones a las que llega Grey.

Grey señala que en el eje que se refiere a la distribución de energía espectral, el corno francés (FH) y las cuerdas S3) tienen un ancho de banda en el espectro relativamente estrecho (pocos armónicos) con la mayoría de la energía, concentrada en los armónicos más bajos. En el otro extremo el trombón (TM) tiene un ancho de banda espectral muy amplio (muchos armónicos) con la energía distribuida en ella, de forma más uniforme.

El eje X se refiere a la distribución de energía temporal, concretamente a cómo se alinean los parciales durante el ataque y el decaimiento. En un extremo, el aumento de los armónicos de los aliento-madera entran y salen simultáneamente al inicio y la terminación de una nota. En el otro extremo, los armónicos superiores de las cuerdas, los metales, la flauta y el fagot tienden a entrar después de armónicos bajos y a salir más rápidamente que los armónicos inferiores.

El eje X expresa también características que comparten las familias de instrumentos musicales. Los instrumentos aliento madera aparecen en el extremo izquierdo, la de metales en el centro, y las cuerdas en el extremo derecho. Las excepciones a este patrón son la agrupación de metales o cobres con el fagot, y la flauta con las cuerdas.

Grey también interpretó el eje Z en términos de patrones temporales. Sobre un extremo, en las cuerdas, la flauta, los clarinetes, los saxofones (X1, X2), y el oboe (O1) se visualiza alta frecuencia y baja amplitud en la energía, la mayoría de las veces inarmónicos, durante el segmento de ataque. Los tonos en el otro extremo, incluyendo metales, fagot, cornos francés e inglés, o bien, tienen baja frecuencia inarmónica o al menos no energía de alta frecuencia inicial en el ataque.

Grey también realiza análisis de datos agrupados. Las líneas en la figura indican la más fuerte agrupación, seguido de guiones, a continuación, las líneas punteadas. Por ejemplo, la cuerda S1 es más como la flauta, y la cuerda S2 es más como la cuerda S3. Asimismo, el grupo (S1, FL) es más como el grupo (S2, S3) que el grupo (FH, BN, TP). Por último, el grupo (S1, FL) es más como el grupo (FH, BN, TP) que cualquier cosa, exceptuando el grupo (S2, S3).

1.5 Timbre en relación con la afinación y las escalas - Curvas de disonancia – timbres alargados y comprimidos. (Sethares)

Otra forma de estudiar el timbre, ha sido a través de la relación entre el espectro acústico de los sonidos y la afinación de los intervalos y escalas musicales.. William Sethares, ha dicho que la música occidental, usa afinaciones que guardan una estrecha relación con los timbres de sus instrumentos musicales, en particular con la voz y los aerófonos; En su artículo *Local Consonance and the Relationship Between Timbre and Scale*. (1993) explica la relación entre el espectro de un sonido (su timbre) y una afinación (o escala) en la que la combinación de sonidos con ese timbre, aparecerá más consonante. Esta relación se define en términos de los mínimos locales de una familia de curvas de disonancia.

Las curvas de disonancia están hechas midiendo la aspereza entre dos sonidos al trasponer uno de ellos. Los parciales del sonido de referencia y del transpuesto son pesados unos contra otros de acuerdo a la curva de aspereza de Plomp y Levelt (es decir, de acuerdo al comportamiento de la aspereza según la banda crítica. (Lach Lau, 2008)

Sethares dice que: la gente consistentemente juzga la consonancia de intervalos, así como juzga la consonancia de intervalos compuesta por puras ondas seno. Estos juicios son promediados en una "curva de consonancia", la cual es usada para calcular la consonancia de timbres complejos. Los resultados de tales cálculos concuerdan con la noción normal (musical) de consonancia cuando es aplicada a los timbres armónicos. De esta forma los unísonos, octavas, quintas y cuartas son altamente constantes mientras que las segundas y séptimas son relativamente disonantes. (Lach Lau, 2008)

Si un timbre es sonado en varios intervalos, la disonancia de los intervalos puede ser calculada sumando todas las disonancias entre todos los pares de parciales. Hacer este cálculo para un rango de intervalos nos da por resultado la curva de disonancia. (Sethares, 1993)

El principio de *Consonancia local*: describe la relación entre el timbre de un sonido y la entonación (o escala) en la cual, la combinación de sonidos con ese timbre, sonará de manera más consonante

En *Relating Tuning and Timbre*, (1997), Sethares presenta técnicas computacionales que responden a dos preguntas: Dado un timbre, ¿en qué escala debe ser tocado?; dada la escala deseada, ¿cómo pueden ser elegidos timbres adecuados?, también proporciona varios ejemplos concretos, incluyendo la identificación de las escalas para timbres no armónicos, timbres estirados y comprimidos, timbres FM con relación arbitraria (no necesariamente de números enteros) entre las frecuencias portadora y de modulación, así como formas de encontrar timbres para escalas de temperamento igual y arbitrario.

Al construir escalas que no tienen 12 tonos únicamente, Sethares encontró que ciertos timbres suenan bien en ciertas escalas y no en otras. En su escrito muestra cómo diseñar

timbres y escalas que se complementan. Esto sugiere una manera de diseñar nuevos instrumentos musicales con timbres inusuales que pueden tocarse en escalas inusuales; pero de manera consonante.

Una curva de disonancia en una escala de 12 tonos de temperamento igual, contiene caídas bruscas (mínimos locales de disonancia o consonancias locales) en muchos de los intervalos. El intervalo más consonante es el unísono, seguido por la octava. A continuación la quinta, seguido por la cuarta, la tercera mayor, la sexta mayor y la tercera menor. Estos concuerdan con los usos y experiencia musicales estándar. Un análisis más cercano de la información muestra que el mínimo no ocurre exactamente en los pasos escalados de la escala de 12 tonos de temperamento igual, pues ocurren en los intervalos simples "cercaños" 1:1, 2:1, 3:2, 4:3, 5:4, y 5:3 respectivamente, que corresponden exactamente con las localizaciones de notas en las escalas de (entonación justa) (ver Wilkinson). De esta forma, un argumento basado en la consonancia tonal es consistente con el uso de la entonación justa (escalas basadas en intervalos con relaciones de números enteros simples), por lo menos para los timbres armónicos. (Sethares, 1997)

La mayoría de los intervalos de la escala mayor, coinciden burdamente con los mínimos locales de la curva de disonancia. De esta forma, el oído percibe intervalos que ocurren en puntos del mínimo local en la curva de disonancia en tanto que son relativamente consonantes. Esta observación constituye la base del principio de la consonancia local. (Lach Lau, 2008)

Se dice entonces, que si el timbre genera una curva de disonancia, cuyos mínimos locales ocurren en posiciones de la escala, en las que el timbre y la escala se encuentran relacionados de manera consonante.

La curva de disonancia puede tener tres contornos diferentes: si los parciales están muy juntos, entonces no hay puntos de consonancia local; si los parciales están ampliamente separados, entonces hay dos mínimos locales; si son intermedios, entonces hay sólo uno.

A continuación se muestran algunas propiedades generales de las curvas de disonancia,

según Sethares, suponiendo que el timbre F tiene n parciales localizadas en las frecuencias (f_1, f_2, \dots, f_n) .

Propiedad 1: El unisono es el minimo global (el valor más bajo posible de la curva de disonancia). Todos los otros minimos son locales.

Propiedad 2: En tanto que el intervalo crece, la disonancia debe acercarse a un valor que no es mayor que la disonancia intrinseca del timbre.

Propiedad 3: La curva de disonancia generada por F tiene cuando mucho $2n(n-1)$ minimos locales, los cuales se localizan simétricamente (en una escala logaritmica) de forma tal que una mitad ocurre para intervalos entre 0 y 1, mientras que la otra la mitad ocurre para intervalos entre 1 e infinito.

Propiedad 4: La mitad de los minimos locales, ocurre en intervalos en los cuales

$$a = f_1/f_j \text{ donde } f_1 \text{ y } f_j \text{ son parciales arbitrarios de } F.$$

La cuarta propiedad indica, cuales puntos de consonancia local tienden a ocurrir en intervalos que están simplemente definidos por los parciales del timbre. De esta manera, las curvas de disonancia generalmente tienen menos de $2n(n-1)$ minimos locales. (Sethares, 1997)

Nombre de nota	12 intervalos iguales	Curva de mínima Disonancia	Intervalos Justos	
C	1.0	1.0	1:1	Unísono
C#	1.059		16:15	Semitono justo
D	1.122	1.14 (8:7 = Sept. mayor. 2)	9:8	Tono entero justo
D#	1.189	1.17 (7:6 = Sept. menor. 3)		
		1.2 (6:5)	6:5	3ª menor justa
E	1.26	1.25 (5:4)	5:4	3ª mayor justa
F	1.335	1.33 (4:3)	4:3	4ª perfecta justa
F#	1.414	1.4 (7:5 = Sept. Tritono)	45:32	4ª Aumentada justa
G	1.498	1.5 (3:2)	3:2	5ª perfecta
	1.587	1.6 (8:5)	8:5	6ª menor justa
A	1.682	1.67 (5:3)	5:3	6ª mayor justa
A#	1.782	1.75 (7:4 = Sept. menor 7)	16:9	7ª menor justa
B	1.888	1.8 (9:5 = Sept. mayor justa larga 7)	15:8	7ª mayor justa
C	2.0	2.0	2:1	Octava

Cuadro 1. Notas de la escala musical de temperamento igual, comparada con los mínimos de la curva de disonancia para un timbre armónico de 9 parciales, y comparada con la escala mayor de Entonación Justa de Wilkinson.

En cierto sentido, esto proporciona la base psicoacústica para las escalas entonadas justamente. En términos de consonancia tonal, el oído es bastante insensible a pequeñas desviaciones en frecuencia, y la entonación de la afinación de 12 tonos iguales puede verse como un compromiso aceptable entre el deseo, basado en la consonancia, de tocar escalas entonadas justamente y los aspectos prácticos de la estandarización instrumental.

Timbres alargados y comprimidos

Slaymaker, Mathews y Pierce han investigado timbres con parciales en $f_j = f A^{\log(j)}$ donde el logaritmo está tomado con base 2. Cuando $A=2$, este es simplemente un timbre armónico, ya que $f_j = f 2^{\log(j)} = jf$. Cuando $A<2$, las frecuencias del timbre están comprimidas, mientras que cuando $A>2$, los parciales están alargados. El aspecto más destacado de los timbres alargados y comprimidos es la falta de una octava real. Esto puede verse desde las curvas de disonancia, las cuales están dibujadas en los cuatro paneles de la figura siguiente para $A=1.87$, 2.0, 2.1, y 2.2 respectivamente. En cada caso, el intervalo de frecuencia A juega el rol de la octava, la cual Mathews y Pierce llaman la *pseudo-octava*. Las octavas reales suenan disonantes e irresueltas cuando A es diferente de 2, mientras que las *pseudo-octavas* son altamente consonantes. Aún más importante, cada curva tiene un contorno similar. Los puntos de consonancia local ocurren en (o cerca de) los doce pasos iguales de las *pseudo-octavas*. *Pseudo-quintas*, *pseudo-cuartas* y *pseudo-terceras* que son fácilmente discernibles. Esto sugiere que mucha de la teoría y práctica musicales, puede ser transferida a timbres comprimidos y alargados, cuando es tocada en una escala comprimida y alargada.

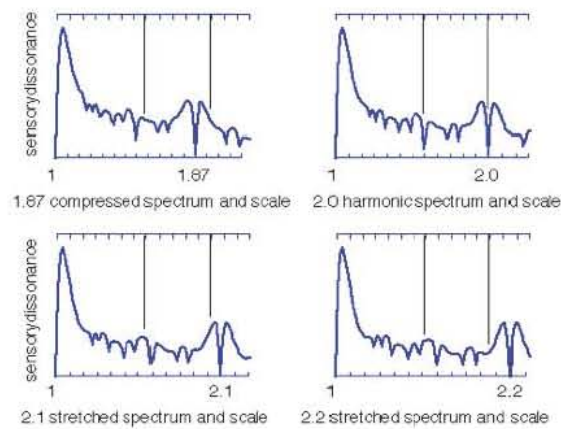


Figura 11. Escala y espectro comprimidos. $A = 1.67$, Escala y espectro armónicos. $A = 2.0$, Escala y espectro alargados $A = 2.1$; Escala y espectro *alargados* $A = 2.2$. (Sethares, 1997)

Afinaciones para timbres de FM

Un método de síntesis de sonido es el de frecuencia modulada (FM). Las relaciones entre las frecuencias portadora y de modulación que no corresponden exactamente con números enteros, dan timbres inarmónicos que son típicamente relegados a sonidos percusivos o de campana, debido a su carácter disonante al ser tocados en armonías tradicionales de 12 tonos. El principio de la consonancia local sugiere que estos sonidos pueden ser tocados de manera más armoniosa (consonante) en escalas que son determinadas por los timbres mismos. Un programa de cómputo, desarrollado en la forma de un Java applet por James Forrest, permite la exploración inmediata y directa de los timbres de FM y sus curvas de disonancia.

La escala óptima para un timbre dado se puede encontrar localizando los mínimos locales de la curva de disonancia. Una implicación es que la noción musical de consonancia de intervalos tales como la octava y la quinta puede ser vista como el resultado del timbre de los instrumentos que usamos típicamente. De manera similar, las escalas afinadas de

manera justa pueden ser vistas como una consecuencia de los timbres armónicos de los instrumentos musicales. (Sethares, 1997)

La llegada de sintetizadores musicales, capaces de realizar sonidos arbitrarios, permite la exploración de espacios acústicos inarmónicos. El principio de la consonancia local proporciona guías sobre cómo relacionar el timbre y la entonación. De manera más ambiciosa, es fácil imaginar nuevos instrumentos inarmónicos que sean capaces de tocar música consonante. (Sethares, 1997)

Las técnicas de computadora presentadas en el artículo citado, permiten especificaciones de timbres y afinaciones para tales instrumentos.

1.6 Modos de Vibración (Gareth Loy)

La investigación ha demostrado que las dos estructuras más importantes de la percepción del timbre son la distribución de energía espectral y la evolución de la distribución de energía espectral en el tiempo. Por lo tanto, el timbre se compone principalmente de las propiedades estáticas y dinámicas de un espectro de sonido, dejando de lado el tono, volumen y duración. Se ha demostrado que la identificación del timbre, depende en gran medida de la evolución espectral. (Gareth Loy, 2007)

Modos de vibración

Cada parcial es creado por un modo específico de movimiento del sistema de vibración del instrumento. Por ejemplo, considere una cuerda que vibra. Su frecuencia fundamental es generada por la parte de la energía total en la cuerda que vibra con coherencia a lo largo de toda su longitud (modo 1 en la figura). Las vibraciones a lo largo de toda una cadena que se llama modo 1 de vibración.

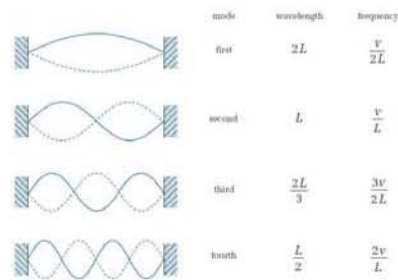


Fig. 12 Modos de vibración

No toda la energía de la vibración en una cuerda corresponde al modo 1; otra parte de la energía presiona o empuja una parte de la cuerda hacia abajo, mientras que el otro extremo crece o aumenta hacia el final del contador (el modo 2 en la figura). La frecuencia de estas vibraciones es el doble de la frecuencia de la fundamental, y corresponde al segundo armónico. Algunas partes de la energía de las cuerdas van a vibrar equilibradamente en tres regiones (modo 3 en la figura) correspondiendo al tercer armónico. Para muchos sistemas de vibración (pero no en todos), a mayor número de modo, menos energía tiene.

Los instrumentos de cuerda pueden tener docenas de modos de vibración con peso significativo en la energía.

No todos los sistemas de vibración contienen todos los modos posibles. El clarinete tiene energía sólo en la fundamental y en armónicos impares. Algunos sistemas de vibración no dividen la vibración en proporciones de números enteros como hacen las cuerdas. Los parciales inarmónicos de instrumentos tales como campanas y tambores no son múltiplos enteros de una fundamental.

El espectro de un sonido, muestra las intensidades y frecuencias de las sinusoides que componen el sonido. Un espectro muestra la distribución de la energía de la frecuencia de una forma de onda. El espectro comprende el conjunto de todas las posibles frecuencias de menos infinito, a más infinito hertz, (Hz.), a todas las intensidades de 0 a infinito en decibeles (dB) (midiendo desde el silencio subjetivo, o umbral auditivo). El espectro de un sonido será un subconjunto infinito de este espacio bidimensional. Cuando todas las

frecuencias son múltiplos enteros de la fundamental, el espectro es armónico. Cuando los componentes no son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental, el espectro es inarmónico.

Gareth Loy, señala que para calcular el espectro de un sonido, hay que tener cierta extensión del mismo a analizar. Si queremos capturar todos los datos espectrales disponibles en una forma de onda, la matemática del análisis espectral nos obliga a observar el sonido no sólo en el intervalo de tiempo que corresponde a su duración, sino en todo momento, a lo largo de la escala de tiempo, desde menos infinito a más infinito. Esto es posible lograrlo, sólo con técnicas matemáticas que permiten analizar los sonidos con duración ilimitada. Una forma de onda de duración corta, no nos permitirá caracterizar su espectro de manera precisa, pues hay alguna incertidumbre inherente entre los puntos de vista temporal y espectral de ondas de longitud finita, (en similitud con el principio de incertidumbre de Heisenberg en la Física Cuántica)

La duración de sonido disponible para el análisis espectral determina el tipo de espectro que se puede crear. *Un espectro estático muestra la distribución de energía de las parciales disponibles durante un periodo bastante largo de tiempo, como la duración de una nota. Los espectros estáticos muestran el promedio de las intensidades parciales durante la duración de toda una nota. Como los espectros estáticos muestran promedios, no pueden demostrar, cómo es la distribución de la energía de un sonido que cambia dinámicamente en la duración de la nota. Los espectros estáticos pueden ser útiles, por ejemplo, para confirmar si un sonido es armónico o inarmónico.* (Gareth Loy, 2007)

Según Gareth Loy, nuestros oídos están muy en sintonía con la forma en que los espectros del sonido cambian a través del tiempo, y nos apoyamos en esta información para que nos ayude a identificar el tipo de instrumento que corresponde con un sonido. La energía vibracional radiada por los instrumentos musicales se desarrolla a través del tiempo, de una forma característica sobre la base de las propiedades físicas del instrumento y de cómo participa el músico. Los elementos dinámicos del espectro en un instrumento son contribuciones que incluyen vibrato, trémolo, glissando, crescendo, y decrescendo.

También hay propiedades dinámicas de la vibración del instrumento que están

determinados en gran medida por la interacción de la física del instrumento y la física del tacto del artista intérprete o ejecutante. Evidentemente, sería muy útil si pudiéramos captar la evolución de la forma de los espectros a través del tiempo. (espectro dinámico).

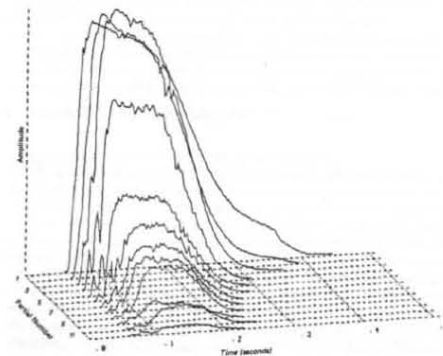
Supongamos que tenemos una nota musical que dura varios segundos. Podemos observar cómo evoluciona su distribución de energía a través del tiempo de la siguiente manera:

- 1.- Dividir la nota en una secuencia de breves segmentos de sonido de duración, a cada pequeña fracción de segundo.
- 2.- Tomar el espectro estático de sonido de cada segmento por separado.
- 3.- Reunir los espectros en secuencia ordenados en el tiempo.

Imaginando la impresión del espectro estático en un panel de vidrio, y luego montar los siguientes espectros estáticos en el panel, ordenados en el tiempo. Mirando a través de los cristales, se puede observar como cambia el espectro del sonido es decir, la amplitud de cada parcial a través del tiempo. (Loy, 2006)

El espectro estático de un tono se puede representar en dos dimensiones. Ya puede ser midiendo la amplitud frente a la frecuencia.; o también puede ser midiendo la amplitud frente al tiempo.

Un espectro dinámico puede representarse en tres dimensiones: tiempo, amplitud y frecuencia.



Amplitud, frecuencia y tiempo tomada del tono de un instrumento de cuerda.

La figura (5), mostrada y utilizada por varios investigadores citados con anterioridad; muestra un espectro dinámico como un conjunto de espectros ordenados en el tiempo.

El eje X muestra el tiempo, el eje Y la intensidad, y el eje Z la frecuencia. Líneas de puntos parciales se conectan a la misma frecuencia, en rebanadas espectrales adyacentes; mostrando la forma en que cambia la amplitud de cada parcial a través del tiempo. (Loy, 2006)

Se puede observar entre otras cosas, el espaciado uniforme de los parciales que a lo largo del eje sugiere una frecuencia del espectro armónico. Hay relativamente pocos parciales con un peso significativo de la energía. La mayoría de la energía se concentra en los parciales más bajos, y la energía desciende rápidamente al aumentar el número de parcial.

Los armónicos primeros suenan más rápido al inicio que los armónicos siguientes. mientras que son los armónicos cada vez mas altos los que decaen rápidamente.

El envolvente de amplitud de una nota, revela en general, cómo un instrumento disipa la energía que recibe del ejecutante a través del tiempo del sonido. La envolvente de amplitud de los sonidos se divide convencionalmente en cuatro segmentos:

ADSR (Attack-Decay-Sustain-Release)

(A) Ataque, el período de tiempo desde el silencio, cuando la excitación de la energía es aplicada al instrumento, desde que el instrumento esta en su máximo de disipación de energía. El tiempo de ataque típico es de alrededor de 10 ms. y 50 ms., para la mayoría de instrumentos. La energía puede evolucionar de forma desigual durante el ataque, resultando en inestabilidades vibracionales que producen, por ejemplo, un sonido de arañazos en los violines o un warbling en tonos de instrumentos de metal. El oído esta muy en sintonía con estas inestabilidades y utiliza la información acerca de cómo el sonido se inicia, crece, y se estabiliza hasta identificar la fuente u origen de lo que se ha tocado.

(D)Decaimiento, que sigue al ataque. La amplitud de sonido de algunos instrumentos (en

particular, metales) desciende de nuevo a un nivel de sostenimiento, basándose en la cantidad de salida de energía que se aplica continuamente.

(S) Sostenimiento, el período posterior al decaimiento. El funcionamiento físico del instrumento estabiliza la cantidad de energía que se disipa, con la energía excitadora.

(R) Liberación, la parte final del sonido, desde el momento en que ya no se inyecta más energía al instrumento, hasta que toda la energía se disipa y se convierte en silencio.

Gareth Loy, se refiere al concepto de *banda* como una gama o intervalo de frecuencias dentro de un espectro. *El ancho de banda de un sonido es la distancia entre el límite superior y el límite inferior de los intervalos de frecuencia de un sonido. el centro de la banda de una banda es su frecuencia media. El ancho de banda del oído humano es de aproximadamente 17 Hz a 17 KHz. Los sonidos varían enormemente en el ancho de banda. El ancho de banda de un motor a reacción o una cascada de agua supera el espectro audible. Estos sonidos son llamados de banda ancha. Un diapasón tiene un, muy estrecho ancho de banda y su sonido se llama de banda estrecha. La mayoría de los tonos de los instrumentos musicales se encuentran oscilando entre estos dos casos. . (Loy, 2007)*

Un formante es un grupo de frecuencias, dentro de un determinado ancho de banda que son enfatizados o destacados por un sistema de resonancia. La emisión de las vocales producen formantes vocales. Las formantes pueden ser fijas o variables. Los diptongos en el habla son en realidad secuencias de formantes que van cambiando de arriba a abajo en la frecuencia, haciendo énfasis en los parciales más altos o más bajos del sonido hecho por la glotis. (Loy, 2007)

De los estudios que sobre el timbre, Gareth Loy ha presentado, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

El timbre es el espectro de frecuencias en un tono. Un espectro armónico tiene múltiples espaciamientos entre los componentes. Los parciales son generados por los modos de vibración del instrumento. El espectro estático es el promedio de los parciales, a través del tiempo; el espectro dinámico muestra cada parcial en cada momento en el tiempo. Una envolvente de amplitud muestra la intensidad promedio de todos los parciales a través del

tiempo. La voz y la mayoría de los instrumentos tienen resonancias que amplifican o atenúan determinados modos de vibración.

Capítulo 2. Diferentes tipos de Síntesis de Sonido

La síntesis de sonido es una de las herramientas que la tecnología ha aportado en los últimos 70 años, a la construcción de nuevas sonoridades dentro de la música contemporánea. Es importante destacar en primer lugar la diferencia que existe entre el sistema analógico y el sistema digital. El sistema analógico genera y manipula las formas de onda de las señales de sonido, empleando magnitudes con valores continuos, mientras que el sistema digital utiliza magnitudes de valores discretos.

Las técnicas de síntesis digital heredaron los conocimientos desarrollados para la síntesis con medios analógicos. El primer sistema de síntesis digital, Music V, (Mathews, 1969) desarrollado por Max Mathews durante los años sesenta, introdujo el concepto de generador unitario como versión digital de los módulos de los sintetizadores analógicos. Un generador unitario acepta entradas numéricas de control y genera una señal, también numérica, que puede servir como entrada a otro generador unitario o representar directamente un sonido.

Ejemplos de generadores unitarios son: osciladores, filtros, sumadores, multiplicadores, generadores de envolventes, y generadores de números aleatorios. A partir de la combinación de estos elementos, se pueden crear sonidos sintéticos similares a los obtenidos con los módulos controlados por voltaje de los sintetizadores analógicos, pero con un control mucho más preciso. La mayor parte de sistemas desarrollados desde entonces han partido de estos conceptos.

Las técnicas de síntesis comprenden a los medios de producción de sonido, electrónicos o digitales, que no utilizan fuentes físicas acústicas (excepto cuando sirven de modelo).

Las técnicas de resíntesis se ocupan de la modificación de sonidos grabados o sintetizados ya existentes, generalmente aplicando un algoritmo informático sobre alguna forma de representación digital del sonido. Frecuentemente las técnicas de resíntesis implican la creación de un nuevo sonido de *salida* basado en la técnica de procesamiento de señales que se desee aplicar al sonido original de "entrada".

Procesamiento de señales.

El procesamiento de señales es la modificación de la representación electrónica o digital de material sonoro o visual. Múltiples técnicas de procesamiento de señales se emplean en la música electroacústica para refinar, modificar o transformar el material sonoro.

DSP (*Digital Signal Processing*), significa Procesamiento Digital de Señales y se refiere a todas las formas de procesamiento digital que pueden aplicarse a archivos de audio, muestras sonoras o sonidos grabados. La finalidad es usualmente transformar el sonido de algún modo.

2.1 Diferentes clasificaciones de la síntesis de sonido

Tradicionalmente, las técnicas de síntesis digital se han clasificado en síntesis aditiva, síntesis por sustracción, y síntesis no-lineal. La síntesis aditiva está basada en la suma de sonidos elementales, cada uno de ellos generado por un oscilador. La síntesis por sustracción se basa en la idea complementaria, es decir, filtrando (amplificando, reduciendo o eliminando) energía presente inicialmente en un sonido complejo. La síntesis no-lineal incluye un gran número de técnicas basadas en ecuaciones matemáticas de comportamiento no-lineal.

En su libro *The Computer Music Tutorial* (1996), Curtis Roads propone la siguiente clasificación para la síntesis de sonidos:

- 1.- Sampling y síntesis aditiva.
- 2.- Síntesis mediante múltiples tablas de ondas, wave terrain, síntesis granular, y substractiva.
- 3.- Síntesis por modulación : Ring, AM, FM, distorsión de fase y forma de onda.
- 4.- Síntesis mediante modelos físicos.
- 5.- Síntesis por segmento de ondas, síntesis gráfica y estocástica.

Por otra parte, Dodge y Jerse (1997) usan el siguiente esquema de clasificación:

- 1.- Síntesis utilizando técnicas no perturbativas: aditiva, AM, modulación de anillo.
- 2.- Síntesis utilizando técnicas perturbativas: FM, waveshaping, síntesis usando fórmulas aditivas discretas.
- 3.- Síntesis substractiva.
- 4.- Síntesis para el análisis de datos: voz, STFT, phase , vocoder, wavelets.
- 5.- Síntesis granular.
- 6.- Modelos físicos.

En 1991, Smith propone una clasificación mas detallada dividiendo los métodos de síntesis en cuatro grupos: 1.- Algoritmos abstractos, 2.- Grabación procesada, 3.- Modelos espectrales y 4.- Modelos físicos

De acuerdo con Serra, una forma de entender la clasificación de Smith es hablar de los métodos de síntesis como técnicas digitales que nos permiten obtener una sonoridad continua que va desde la reproducción de sonidos pre-existentes (grabados) hasta la generación de sonidos mediante una abstracción (sonidos imaginados), pasando por todos los pasos intermedios. En este contexto, técnicas basadas en el procesamiento de grabaciones tienen como fundamento la pre-existencia de sonidos e intentan crear sonidos nuevos o imaginarios. En el otro extremo de la clasificación están los algoritmos abstractos, que de ecuaciones matemáticas generan sonidos que distan de los sonidos naturales; pero que manipulándolos, se obtienen sonidos que nos permiten una comunicación musical específica, como por ejemplo, los sintetizadores basados en técnicas de FM. Los modelos espectrales y físicos están en la zona intermedia y tienen su fundamento en modelos o abstracciones que describen sonidos pre-existentes y los objetos que lo generan. Esto nos permite la exploración de la conexión entre el sonido real y el sonido virtual

Dado el gran número de técnicas de síntesis que han sido propuestas en la literatura, especializada, surge la inquietud de cómo evaluar o comparar cada una de las aproximaciones. Jaffe dice :*Un gran número de técnicas de síntesis y procesamiento se han inventado.* (Jaffe, 1995) en (Cádiz 2008). Pero, ¿cual es la mejor?

Serra menciona cuatro consideraciones que se deben tener en cuenta, al escoger una técnica de síntesis específica. (Cádiz 2008)

Calidad del sonido. Con esto queremos expresar la riqueza del sonido. Un sonido de gran calidad será uno que se asemeje a un sonido natural, en cambio uno de baja calidad será un sonido simple, sintetizado electrónicamente sin micro-variaciones durante su duración.

Flexibilidad. Este término describe la habilidad que tiene una técnica de síntesis específica, para modificar el sonido, desde el control de un conjunto reducido de parámetros. Bajo este criterio, un *sampler* no es considerado como flexible, en cambio la síntesis FM, sí lo es.

Generalidad. Por generalidad se entiende la posibilidad de una técnica de síntesis de crear una gran variedad de timbres. Así, la síntesis aditiva será una técnica general, en tanto que el *sampler* será una técnica mucho más específica.

Tiempo de cómputo. Esto se refiere al número de instrucciones computacionales que se necesitan para sintetizar un sonido. En este contexto, la síntesis FM es muy económica en comparación con la síntesis aditiva, la cual resulta muy costosa computacionalmente.

Jaffe definió en forma de pregunta los siguientes criterios, para evaluar métodos de síntesis de sonido:

- 1.- ¿Qué tan intuitivos son los parámetros?
- 2.- ¿Qué tan perceptibles son los cambios en los parámetros?
- 3.- ¿Qué tan físicos son los parámetros?
- 4.- ¿Qué tan eficaces son los parámetros?
- 5.- ¿Qué tan robusta es la identidad sonora? ¿Que tan rico en componentes es el sonido?
- 6.- ¿Qué tan eficiente es el algoritmo?
- 7.- ¿Qué tan pequeño es el control sobre el flujo (stream)
- 8.- ¿Qué clase de sonidos puede ser representado?
- 9.- ¿Cual es la más pequeña latencia?
- 10.- ¿Existen herramientas de análisis?

(Jaffe, 1995) (Cádiz 2008)

Si bien es importante contestar estas preguntas para cada método nuevo de síntesis, la respuesta sobre, cual método es el más adecuado depende en gran medida de su aplicación y de los recursos disponibles.

2.2 Síntesis lineal y no lineal

Síntesis y linealidad

Las técnicas de síntesis lineal pueden generalmente ser usadas para reproducir un sonido que es idéntico a un original. Las técnicas no lineales, generalmente no son el camino para reproducir un sonido que es idéntico a un original, aunque proporciona otras ventajas, como economía para el cálculo o el acceso a un uso intuitivo.

Síntesis Lineal

Las características de un sistema lineal, son la superposición y la proporcionalidad.

Superposición: El procesamiento de la suma (combinación o superposición) de dos señales sin procesar, es equivalente a la suma de las señales ya procesadas.

Para dos señales sin procesar X_1 y X_2 , y una función de procesamiento F , se tiene que

si $F(X_1) = Y_1$, y $F(X_2) = Y_2$, son las señales procesadas:

entonces F cumple el criterio de superposición si $F(X_1 + X_2) = Y_1 + Y_2$,

Proporcionalidad: El procesamiento de una versión amplificada (proporcional) de una señal sin procesar, es equivalente a la versión amplificada de la señal ya procesada.

Si $F(aX_1) = aY_1$; entonces F cumple con el criterio de proporcionalidad.

La función F es lineal si cumple con los criterios de superposición y de proporcionalidad.

Si $F(X_1 + X_2) = Y_1 + Y_2$, y $F(aX_1 + bX_2) = aY_1 + bY_2$; entonces la función F es lineal.

Tipos de síntesis no lineal

Alguna técnica que no suponga o contemple el criterio de proporcionalidad y superposición es una técnica no lineal.

La primera limitación de las técnicas de síntesis no lineal, es que no tiene la transformada inversa, o sea que no se puede usar para reproducir exactamente un sonido original.

La característica de muchos sistemas de síntesis lineal es que la cantidad de datos del análisis requiere grandes cantidades de cálculo o de almacenamiento de los datos, o ambos, para producir una síntesis de sonido realista. Las técnicas no lineales suelen ser mucho más económicas, pero su uso es menos general. Eso no significa que no podemos predecir el tipo de sonido que se va a obtener de una técnica no lineal, sino que simplemente no necesariamente es capaz de producir un sonido exactamente. Puede resultar imposible que una técnica no lineal pueda producir un determinado tipo de sonido, independientemente de los parámetros utilizados. Un sistema no lineal es generalmente más eficiente computacionalmente que las formas de síntesis lineal. Algunos, como la modulación de frecuencia, son un buen modelo instrumental de timbres con pocos parámetros y cálculo.

El elemento central de muchas técnicas no lineales es la modulación. En el ámbito de la síntesis de sonido, tiene el significado de la aplicación en el tiempo, de diferentes cambios a la señal original. Los aspectos de la señal que son explotados por la síntesis no lineal incluyen:

Amplitud, donde una señal es saturada o recortada, o cuando existe respuesta desigual de amplitud, a diferentes frecuencias (filtrado).

Frecuencia: donde nuevas frecuencias son producidas en respuesta a una señal de entrada.

Fase: donde la fase de la señal de salida no es una función lineal de la fase de entrada.

2.3 Fundamentos básicos

Osciladores: Una oscilación es la variación periódica en el tiempo de alguna medida en torno a un valor central o de equilibrio o entre dos o más estados. Ejemplos de oscilaciones en el mundo físico son un péndulo o un resorte. En un sistema de cómputo, un oscilador puede implementarse en forma algorítmica, el requisito indispensable es que la señal se repita después de un cierto tiempo.

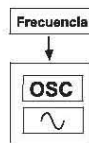


Figura 13. Oscilador. (Cádiz 2008)

Para sintetizar sonidos, es necesario disponer de señales básicas mediante las cuales se puedan construir sonidos más complejos. Esto se hace a través de un oscilador. Un oscilador consiste básicamente en un algoritmo o dispositivo que es capaz generar señales periódicas o aleatorias. El oscilador más común es un oscilador sinusoidal, el cual genera señales sinusoidales con una amplitud, frecuencia y fase determinada. Un oscilador puede también generar distintos tipos de señales estocásticas o ruidos, tales como ruido blanco, ruido café o ruido rosa.

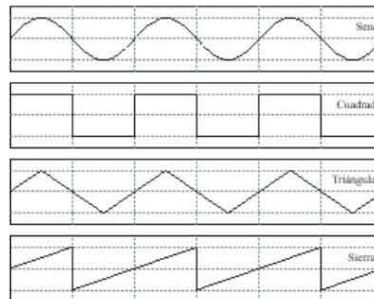


Figura 14. Señales básicas utilizadas comúnmente en osciladores. (Cádiz 2008)

Por lo general, los osciladores generan funciones básicas, como las descritas en la figura. Esto es debido a un límite en el ancho de banda disponible dada la tasa de muestreo del sistema. Si la señal generada por el oscilador contiene componentes de frecuencia muy elevados, es probable que al generar el audio se produzca un tipo de distorsión denominado *efecto de alias* (generación de frecuencias distintas de las que están presentes en la señal digital original). Para evitar esto, es común implementar osciladores de ancho de banda limitada, los cuales evitan generar componentes de frecuencia más allá de un cierto límite.

Tabla de ondas

Un oscilador por lo general lee los datos necesarios desde una tabla de ondas. Una tabla de ondas (*wavetable*), consiste básicamente en un sector de memoria informática donde se puede almacenar una señal de audio. La tabla puede contener audio generado en forma sintética o una señal proveniente del mundo real muestreada. Es común almacenar en una tabla de onda un ciclo de una onda de sonido cualquiera.

Un oscilador puede entonces leer datos desde la tabla de onda a distintas frecuencias y con eso puede generar una onda periódica de frecuencia arbitraria cuya forma de onda se encuentra determinada por los datos almacenados en la tabla.

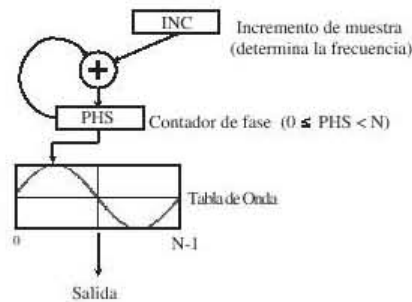


Figura15. Algoritmo de un oscilador digital de sonidos. (Cádiz 2008)

La figura detalla el principio básico de funcionamiento de un oscilador. Un oscilador tiene

dos contadores: uno que lleva la posición en la tabla de ondas desde la cual se está leyendo, denominado contador de fase, y otro llamado incremento, que contiene la cantidad de muestras que deben saltarse para leer desde la siguiente posición de fase. La cantidad de incremento determina la frecuencia del sonido generado por el oscilador. Mientras mayor sea el incremento, la tabla de onda se completa más rápido y mayor es la frecuencia de la señal generada.

Dado que usualmente se especifica la frecuencia deseada y no directamente el valor del incremento, es necesario realizar algún tipo de interpolación.

Envolventes

Como lo indican Helmholtz y Gareth Loy en el capítulo anterior, el sonido no es un fenómeno estático. Por el contrario, usualmente cada componente de frecuencia de un sonido tiene vida propia, en el sentido de que adquiere un comportamiento independiente (o casi independiente) en el tiempo. Esto significa que la amplitud de cada parcial recorre una trayectoria o envolvente particular en su evolución temporal. En el dominio del tiempo, el sonido como un todo también tiene un comportamiento definido por una envolvente de amplitud, tal como el mostrado en la figura siguiente.

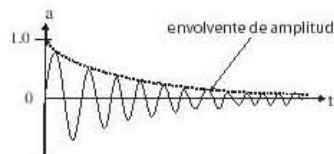


Figura 16. Envolvente de amplitud. (Cádiz, 2008)

La figura muestra la forma de la envolvente de sonidos reales para distintas dinámicas. Claramente, la evolución temporal del sonido es distinta dependiendo del nivel de energía, definido por su contenido de frecuencias, presente en la señal acústica.

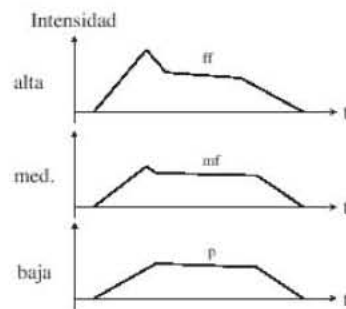


Figura 17. Envolventes para diferentes dinámicas. (Cádiz, 2008)

Existen muchas formas de envolvente, pero por lo general siguen un patrón o evolución común. La forma más genérica de envolvente se denomina ADSR (ataque, decaimiento, sostenimiento, relajamiento) por su abreviatura y mostrada en la figura siguiente. A continuación se describe cada sección de esta envolvente.

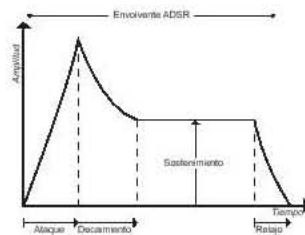


Figura 18. Envolvente ADSR. (Cádiz, 2008)

Ataque. Es el tiempo que toma la señal en alcanzar su máximo

Decaimiento Es el tiempo que toma la señal en estabilizarse

Sostenimiento. Es el tiempo que dura la señal de forma estable.

Relajamiento. Es el tiempo que toma la señal en desvanecerse.

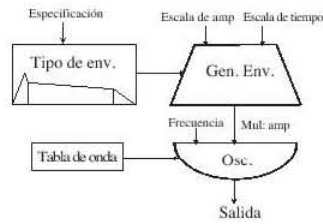


Figura 19. Proceso de generación de envolventes. (Cádiz, 2008)

Las envolventes usualmente se utilizan para controlar la salida de un oscilador. Una vez elegida la forma de la envolvente, esta se escala tanto en tiempo como en amplitud y se multiplica por la salida de un oscilador. De esta forma, es posible manipular el comportamiento temporal de la señal sintetizada.

2.4 Síntesis aditiva: La síntesis aditiva describe la construcción de un tono o forma de onda compleja a partir de elementos simples, como las ondas sinusoidales, de acuerdo con la ley de superposición o síntesis de Fourier. Dicha transformada permite calcular a partir de una señal cualquiera la magnitud y fase de cada una de las componentes frecuenciales que posee, (permite obtener una imagen de la señal en el dominio de la frecuencia, lo que se denomina *ecuación de análisis*). Se trata de una transformada integral reversible ya que permite mediante otra transformación pasar del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo (restaurar la señal original) mediante lo que se denomina antitransformada o transformada inversa (ecuación de síntesis). Es esta anti-transformada la que realiza un proceso de síntesis aditiva, como se puede apreciar en la figura 20.

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad \text{Ecuación de análisis}$$

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad \text{Ecuación de síntesis}$$

$$e^{-j\omega t} = \cos(\omega t) - j \text{sen}(\omega t)$$

$$e^{j\omega t} = \cos(\omega t) + j \text{sen}(\omega t)$$

Figura 20. Transformada de Fourier. Ecuación de síntesis suma infinita de señales

senoidales de diferente amplitud, frecuencia y fase. (Cádiz, 2008)

En este tipo de síntesis es muy importante la utilización de diferentes envolventes (ataque, caída, parte sostenida y extinción) para cada oscilador que le da dinámica y expresividad al sonido resultante. Esta técnica es la más utilizada para imitar sonidos de instrumentos reales.

Si bien esta técnica se basa en la transformada de Fourier, no es necesario seguir el procedimiento al pie de la letra, ya que en un computador perfectamente se pueden sumar sinusoides no armónicas, es decir, señales cuyas frecuencias no estén relacionadas por múltiplos enteros. En este caso, los armónicos se denominan parciales. La figura muestra la suma de 5 sinusoides de distinta amplitud, frecuencia y fase, con relaciones no armónicas entre sí.

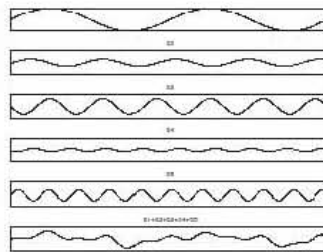


Figura 21. Suma de señales simples para generar una compleja. (Cádiz, 2008)

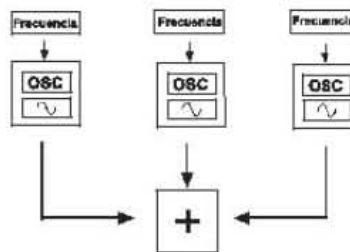


Figura 22. Síntesis aditiva. (Cádiz, 2008)

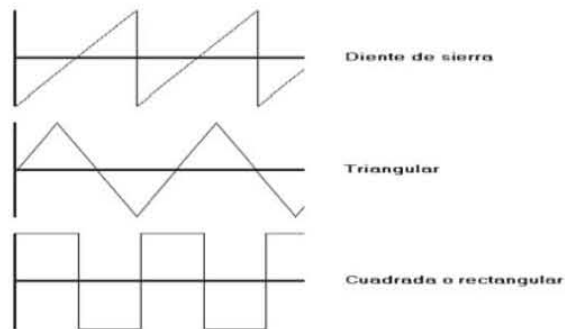


Figura 23. Tipos de onda más usados en música electrónica. (Cádiz, 2008)

2.5 Síntesis sustractiva

En la síntesis sustractiva se sintetiza el sonido mediante la filtración o simplificación de una onda compleja. La señal pasa a través de uno o más filtros que modifican su contenido armónico, atenuando o reforzando determinadas áreas del espectro de la señal. La síntesis sustractiva está basada de cierta manera en la idea inversa de la síntesis aditiva, ya que a partir de señales ricas en contenido de frecuencia, la idea es eliminar ciertas bandas o componentes de manera de generar una señal simplificada. Es por esta razón que usualmente se utilizan señales aleatorias o de ruido como punto de partida ya que poseen un espectro de frecuencias muy rico.

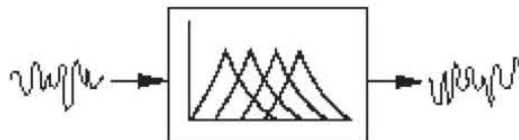


Figura 24. Síntesis sustractiva. (Cádiz, 2008)

Filtros y Síntesis Sustractiva

Partiendo de una señal rica en armónicos aplicamos filtros hasta obtener el espectro de señal deseado. Un filtro es un dispositivo que amplifica ciertas frecuencias y atenúa otras. Existen diferentes tipos de filtros en función de las frecuencias que atenúan y amplifican.

1.- Paso-bajo, que dejan pasar las señales por debajo de una determinada frecuencia llamada frecuencia de corte.

2.- Paso-alto, que dejan pasar las señales por encima de una frecuencia de corte.

3.- Paso-banda, que sólo dejan pasar las señales comprendidas entre dos frecuencias determinadas.

4.- Elimina-banda, que atenúan o eliminan las señales comprendidas entre dos frecuencias determinadas.

Los filtros paso-bajo y paso-alto vienen determinados por la frecuencia de corte y la pendiente de filtrado y los filtros paso-banda y elimina-banda vienen determinados por la frecuencia central de la banda, la anchura de la banda y la pendiente de filtrado a ambos lados de la banda

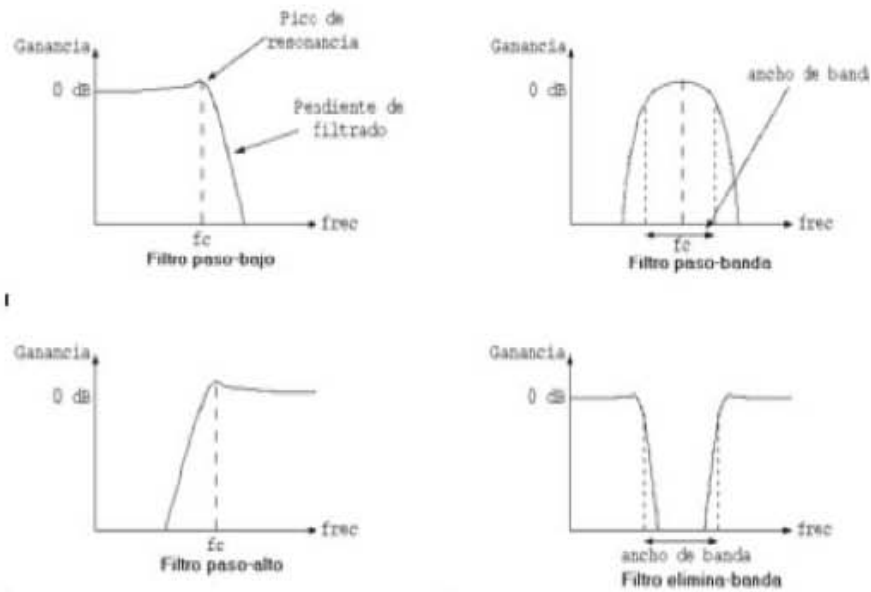


Figura 25. Tipos de filtro (Cádiz, 2008)

Los resultados de la síntesis substractiva dependen en gran medida de la calidad y diseño de los filtros utilizados, y de la manera de poder producir en forma efectiva los cambios requeridos en la señal de entrada. Las características de los filtros se determinan por su función de transferencia y su orden. La primera determina la forma en que la señal aplicada cambia en términos de su amplitud y fase al pasar por el filtro y la segunda describe el grado de precisión en la aceptación o rechazo de frecuencias por encima o por debajo de la respectiva frecuencia de corte.

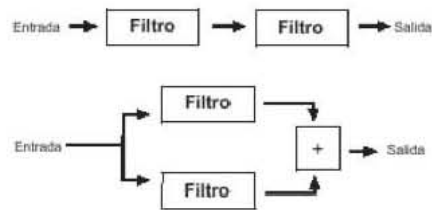


Figura 26. Configuración de filtros en síntesis substractiva. (Cádiz, 2008)

Si se desea obtener más precisión en las frecuencias de corte o bien procesar la señal de distintas maneras, se pueden combinar filtros de primer o segundo orden en dos formas: serie y paralelo, tal como se muestra en la figura 26. En el primer caso, la salida de un filtro alimenta a otro filtro. Un ejemplo de esta configuración podría ser un sonido que primero es pasado por un filtro pasa bajos y luego reverberado mediante otro proceso. En el caso de filtros en paralelo, la señal se ve modificada por uno o más filtros al mismo tiempo y las salidas de estos se suman para generar la señal modificada. Un ejemplo de esta configuración es un ecualizador multibanda.

Existen otro tipo de filtros como son los ecualizadores, que permiten dar la forma que deseemos a la respuesta en frecuencia (atenuar determinadas frecuencias y amplificar otras que nosotros queramos).

2.6 Síntesis granular

La síntesis de sonido basada en granos o síntesis granular es una técnica de producción de sonidos que se basa en una concepción del sonido en términos de partículas o cuantos. Pequeñas unidades de energía encapsuladas en una envolvente y agrupados en conjuntos mayores, cuya organización será determinada por dos métodos principales de distribución temporal: sincrónico y asincrónico. En el método sincrónico, los granos son disparados a frecuencias más o menos regulares para producir sonidos con una altura definida. En contraste, el método asincrónico genera secuencias aleatorias de separación entre los granos con el objetivo de producir una nube sonora (Dodge & Jerse, 262).

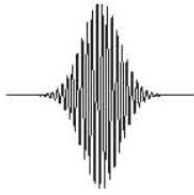


Figura 27. Grano sonoro sinusoidal. (Cádiz, 2008)

La unidad mínima de la síntesis granular es el cuanto sonoro o grano. Estos son fragmentos de sonido muy cortos, cuya longitud oscila entre 5 y 100 milisegundos para evitar que un grano individual pueda producir una respuesta perceptiva de altura en el oyente. La envolvente de los granos es determinada por una ventana temporal de amplitud, usualmente de tipo gaussiana. La figura 28, muestra un grano basado en una onda sinusoidal con una envolvente de tipo gaussiana y la figura 29, un grano con la misma envolvente pero basado en ruido blanco. Las diferencias en la forma de la ventana y el contenido interno definen la cantidad de información espectral en el grano.



Figura 28. Grano ruido blanco. (Cádiz, 2008)

Como ya se dijo anteriormente, la organización de la síntesis granular es determinada por dos métodos principales de distribución temporal: Sincrónico y asincrónico.

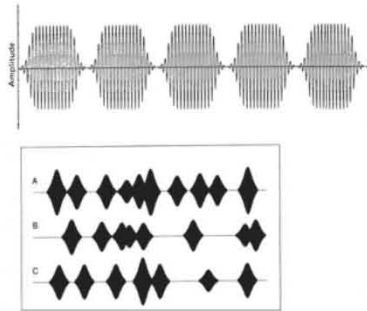


Figura 29. Síntesis Granular casi sincrónica. (Cádiz, 2008)

El método sincrónico, es aquél en el que los granos son disparados a frecuencias más o menos regulares para producir sonidos con un periodo de altura particular.

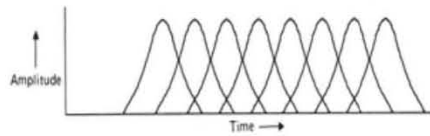


Figura 30. Síntesis granular sincrónica. (Cádiz, 2008)

Por su parte, el método asincrónico distribuye en forma aleatoria las distancias entre los granos, para formar una nube sonora.

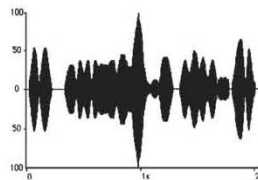


Figura 31. Síntesis granular asincrónica (Dodge & Jerse, 262).

2.7 Modulación

El concepto de modulación se basa en la idea de alterar algún parámetro de una onda sonora en razón de otra onda, o señal de control variable en el tiempo. Las técnicas de modulación suelen también llamarse de distorsión o no lineales, dado que generan componentes armónicos que no es posible de obtener mediante operaciones lineales.

Para explicar el concepto de modulación, consideremos primero un oscilador, como ilustra la figura siguiente, que genera una onda sinusoidal pura, donde todos los parámetros de entrada (amplitud, frecuencia y fase) son constantes.

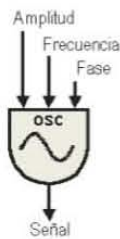


Figura 32. Oscilador con parámetros de entrada. (Gómez, 2009)

La ecuación de la amplitud instantánea de una señal sinusoidal se expresa como sigue:

$$Y = A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi)$$

donde A es la amplitud, f la frecuencia y φ la fase inicial. (se puede también utilizar la notación ω (omega) para la velocidad angular, relacionada con la frecuencia mediante la relación $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$. Podemos, entonces, escribir la fórmula de la forma siguiente:

$$Y = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi)$$

Para obtener una señal modulada, hace falta disponer al menos de dos osciladores de este tipo. La idea de la síntesis por modulación es la de utilizar una de las dos señales (u osciladores) para hacer variar (es decir, para modular) uno de los parámetros de la otra

señal (o del otro oscilador): la salida del primer oscilador se convertiría en una de las entradas del segundo oscilador. En función de la naturaleza del parámetro que se está variando, diremos que efectuamos una modulación de amplitud, de frecuencia o de fase.

Las formas más comunes de modulación son modulación de amplitud o AM, que consiste en alterar la amplitud de una señal llamada portadora, en función de la amplitud de otra señal llamada moduladora y la modulación de frecuencia o FM, que consiste básicamente en variar la frecuencia de una portadora en función de otra señal moduladora.

Musicalmente, una modulación lenta de amplitud corresponde a un trémolo, mientras que una modulación lenta de la frecuencia corresponde a un vibrato. La terminología que se utiliza en síntesis por modulación es la que fue introducida con la primera utilización de la modulación de señales, que se realizó en la transmisión radio (AM y luego FM). Por ello siempre se habla de señal portadora (*carrier*) y de señal moduladora (*modulator*), la cual contiene la información que se quiere transmitir.

Señales unipolares y bipolares

Las características de una modulación pueden depender de la naturaleza de las señales que se utilizan. Una señal unipolar se sitúa siempre en los valores positivos de amplitud, es decir, nunca tiene un valor negativo. En cambio, una señal bipolar, se articula en los valores positivos y negativos de la amplitud, en torno o alrededor del valor cero.

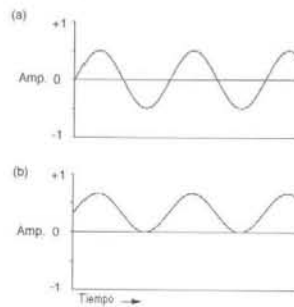


Figura 33. Señal bipolar (a) Señal Unipolar (b) Gómez, 2009)

Esta diferencia es importante para todas las aplicaciones de la modulación, ya que el contenido espectral de la señal resultante será diferente dependiendo del tipo de señal que se utilice.

2.8 Síntesis por modulación de amplitud (AM)

Un modulador AM es un dispositivo con dos señales de entrada, una señal portadora de amplitud y frecuencia constante, y la señal de información o moduladora. El parámetro de la señal portadora que es modificado por la señal moduladora es la amplitud.

En la síntesis AM la señal modulada tendrá una amplitud igual al valor máximo de la señal portadora más el valor instantáneo de la señal modulada.

La modulación de amplitud es idéntica que la modulación en anillo, excepto que la señal moduladora es una señal unipolar. La aplicación más evidente de la modulación de amplitud es la multiplicación de la señal portadora por una envolvente de amplitud

En el caso de las señales sinusoidales, podemos expresar matemáticamente la modulación de amplitud de la forma siguiente:

$$Y_{AM} = A_C \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_C \cdot t)$$

donde:

$$A_C = [1 + A_M \cdot \cos(2\pi \cdot f_M \cdot t)]$$

Por lo tanto, obtenemos:

$$\begin{aligned} & [1 + A_M \cdot \cos(\omega_M \cdot t)] \cdot \sin(\omega_C \cdot t) \\ &= \sin(\omega_C \cdot t) + A_M [\sin(\omega_C \cdot t) \cdot \cos(\omega_M \cdot t)] \\ &= \sin(\omega_C \cdot t) + A_M 2 \cdot [\sin((\omega_C + \omega_M) \cdot t) + \sin((\omega_C - \omega_M) \cdot t)] \end{aligned}$$

Como indica la ecuación final, el espectro resultante de una modulación AM contiene la frecuencia portadora f_C , así como las dos otras componentes $f_C + f_M$ y $f_C - f_M$.

Ejemplo : Si la frecuencia portadora vale 1000 Hz y la moduladora 400 Hz, el espectro

resultante contiene la portadora 1000 Hz, así como las componentes laterales respectivamente en 600 y 1400 Hz (como podemos ver en la Figura 34).

En la ecuación anterior, el factor AM (amplitud de la señal moduladora) es el factor de modulación (I) que permite ajustar la amplitud de las componentes laterales respecto a la componente central. El factor vale 1 en el caso que se ilustra en la figura. Es decir, si la portadora y la moduladora tienen la misma amplitud. En este caso, la amplitud de las componentes laterales vale la mitad de la amplitud de la componente central.

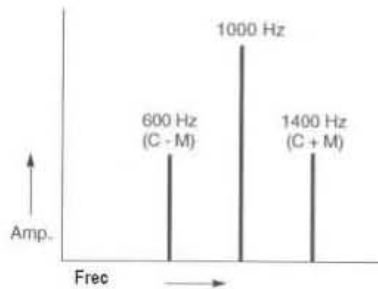


Figura 34. Espectro de modulación (AM) (Gómez, 2009)

Cuando la señal moduladora sea una onda compleja y no sinusoidal como resultado de la modulación AM se obtendrá un conjunto de bandas laterales dados por los armónicos que ésta contenga.

2.9 Síntesis por modulación en anillo (RM).

Este tipo de modulación es clásica en la música electrónica desde sus inicios. La modulación en anillo (en inglés Ring Modulation o RM) se denomina así de la misma forma que su tecnología analógica, y corresponde a la multiplicación de dos señales bipolares. Se multiplica una señal portadora Y_C por una señal moduladora Y_M de la siguiente forma:

$$Y_{RM} = Y_C \times Y_M$$

La Figura 35 ilustra una implementación simple de la modulación en anillo. El primer

oscilador (OSC MOD) genera la señal moduladora, la cuál se envía a la entrada *amplitud* del segundo oscilador (OSC CAR). Es decir, multiplicar dos señales es igual que decir que una señal se convierte en la amplitud de la otra señal. Es importante ver que los dos osciladores leen funciones bipolares, en el caso de la modulación en anillo.

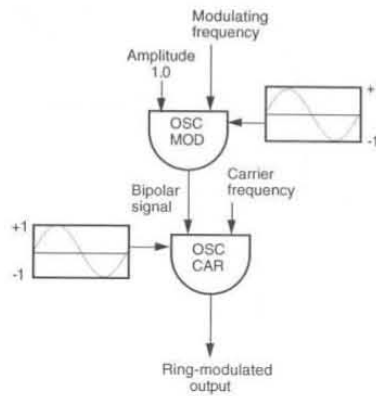


Figura 35. Implementación de Modulación en anillo (Gómez, 2009)

Para saber cuál es el contenido espectral de una señal que resulta de la multiplicación de dos señales sinusoidales, tenemos que recurrir a fórmulas trigonométricas por las cuales se puede deducir que:

$$\cos\alpha \cdot \cos\beta = [\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta)] / 2$$

Si multiplicamos una señal portadora de frecuencia C por una señal moduladora de frecuencia M , la señal resultante no contiene ninguna de las dos frecuencias, sino que por el contrario, contiene dos componentes, una en la suma de las frecuencias de partida ($C+M$) y otra en la diferencia de las frecuencias ($C-M$). En cuanto a la amplitud de las componentes, cada una valdrá la mitad de la amplitud de las señales multiplicadas.

Ejemplo: $f_C = 1000$ H z y $f_M = 400$ H z .

Después de la multiplicación obtendremos componentes a 600 Hz y 1400 Hz, como se

puede ver en la Figura 36.

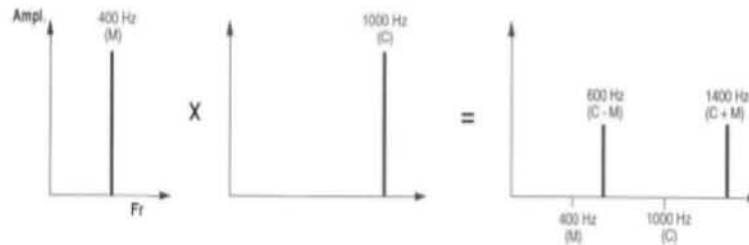


Figura 36. Espectro de Modulación en anillo. (Gómez, 2009)

Si la señal portadora es compleja (es decir, está compuesta por una suma de sinusoides) y la señal moduladora es sinusoidal, la modulación en anillo tiene por efecto el reemplazar cada parcial de la señal portadora por un par de componentes en la suma y la diferencia de frecuencias con la de la señal moduladora.

Si las señales multiplicadas son las dos complejas, entonces el espectro resultante es todavía más rico, ya que contiene las sumas y diferencias de todas las frecuencias que aparecen en las dos señales. El sonido resultante de la modulación en anillo es generalmente inarmónico y de carácter ruidoso, sobre todo si las dos fuentes son complejas.

2.10 Síntesis por modulación de frecuencia (FM)

Otra forma de modular la señal es variar periódicamente la frecuencia mediante otra señal. Esto se denomina síntesis FM o de frecuencia modulada.

Este método de síntesis sonora explota los mismos principios que se utilizan en las transmisiones radiofónicas FM. Fue inventado por John Chowning en 1967. Una variante de este tipo de síntesis (por modulación de fase) es la que se implementa en los famosos sintetizadores DX7 de Yamaha.

En la transmisión por radio, el proceso implica la modulación de la frecuencia de una onda portadora por la señal que contiene la información a transmitir. La frecuencia portadora de una señal de radio FM es del orden de la centena de Megahercios (10^8 Hz). Cuando este método se aplica a la síntesis sonora, la frecuencia portadora se eleva a la

gama de las frecuencias audio (20 Hz a 20.000 Hz), y la moduladora a las frecuencias llamadas más corrientemente, de sub-audio. Si la frecuencia moduladora es inferior a 8 Hz, el resultado de la modulación es un vibrato. (Gómez, 2009)

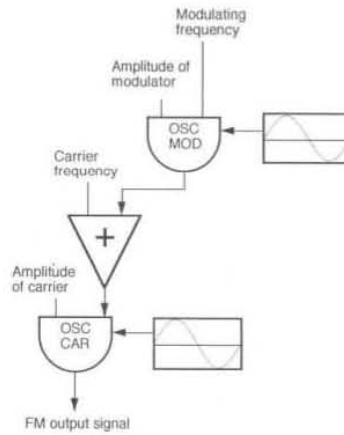


Figura 37. Implementación de Síntesis Frecuencia Modulada (FM) (Gómez, 2009)

La señal modulada se puede expresar de la forma siguiente:

$$Y_{FM} = A_C \cdot \sin((\omega_C + A_M \cdot \sin(\omega_M \cdot t)) \cdot t)$$

El espectro resultante contiene la frecuencia de la portadora, así como toda una serie de frecuencias distribuidas de forma simétrica alrededor de la frecuencia portadora, a distancias iguales en todos los múltiplos enteros de la frecuencia moduladora (el espectro de una señal FM se representa en la Figura 38). Los grupos de componentes de un lado y del otro de la portadora se denominan bandas laterales.

Ejemplo: si la frecuencia portadora C es igual a 800 Hz, y la frecuencia moduladora M es 200 Hz, las bandas laterales contienen las componentes a las frecuencias siguientes:

$$C - M = 600 \text{ H z}$$

$$C + M = 1000 \text{ H z}$$

$$C - (2 \times M) = 400 \text{ H z}$$

$$\begin{aligned}
 C + (2 \times M) &= 1200 \text{ H z} \\
 C - (3 \times M) &= 200 \text{ H z} \\
 C + (3 \times M) &= 1400 \text{ H z} \\
 \text{etc..}
 \end{aligned}$$

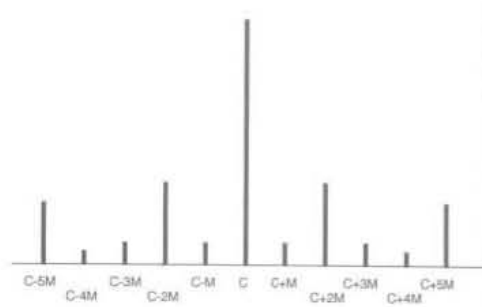


Figura 38. Espectro de una señal FM) (Gómez, 2009)

En este ejemplo, la relación de las frecuencias C:M es un número entero. Por lo tanto, obtenemos un espectro armónico. La altura percibida corresponde a la frecuencia moduladora misma (en este caso es de 200 Hz)

Si la relación C:M no es entera, el espectro resultante es inarmónico. Por ejemplo, consideremos la relación 8:2.1, con C=800 Hz y M=210 Hz. Las frecuencias presentes en el espectro serán:

$$\begin{aligned}
 M &= 210 \text{ H z} ; C = 800 \text{ H z} \\
 C - M &= 590 \text{ H z} \\
 C + M &= 1010 \text{ H z} \\
 C - (2 \times M) &= 380 \text{ H z} \\
 C + (2 \times M) &= 1220 \text{ H z} \\
 C - (3 \times M) &= 170 \text{ H z} \\
 C + (3 \times M) &= 1430 \text{ H z} \\
 \text{etc..}
 \end{aligned}$$

En su artículo, *Sobre la Síntesis de espectros de audio complejos mediante la modulación de frecuencia*. (The síntesis of complex audio-spectra by means of Frequency Modulation);

John Chowning describe matemáticamente la Síntesis FM con la fórmula siguiente:

$$y = A \cdot \sin[\omega_C \cdot t + I \cdot \sin(\omega_M \cdot t)]$$

donde: A es la amplitud de la portadora

ω_C es la frecuencia angular de la portadora (en radianes por segundo)

ω_M es la frecuencia angular moduladora

I es el índice o tasa de modulación

Para una portante c y una modulante m, el espectro resultante es de la forma:

$$c \pm nm \quad n = 1, 2, 3, 4, \dots$$

Cuántas de esas bandas laterales aparecen, y la amplitud de cada una de ellas, dependerá de la magnitud de la modulación. La misma se mide mediante el denominado índice de modulación, que se define como el cociente entre la desviación de frecuencia (amplitud de la modulante) y la frecuencia modulante: $I = d/m$

Cuando el oscilador modulante tiene amplitud cero, $I = 0$, y no hay por tanto modulación, el espectro está conformado únicamente por la frecuencia portante. Cuando la modulante aumenta su amplitud, crece el índice de modulación, y comienzan a aparecer bandas laterales superiores e inferiores, configurando un espectro simétrico en torno a la portante.

Se puede ver que la cantidad de bandas laterales con amplitud significativa aumenta a medida de que crece el índice de modulación. Sin embargo, la evolución de la amplitud de cada componente no es lineal, sino que sigue un patrón de comportamiento no evidente en primera instancia, y que puede determinarse con bastante precisión por medios matemáticos.

La ecuación que define la onda resultante de modular la frecuencia de una senoide (cuya amplitud consideraremos normalizada a 1, para simplificar), por medio de otra senoide, es la siguiente:

$$x(t) = \sin(\alpha t + I \sin \beta t)$$

siendo $x(t)$ la amplitud de la onda en un momento t determinado, y α y β las frecuencias portante y modulante expresadas en radianes/segundo. Esta fórmula puede expandirse en la siguiente serie trigonométrica:

$$\begin{aligned}
 x(t) = & J_0(I)\text{sen}\alpha t \\
 & + J_1(I)[\text{sen}(\alpha + \beta)t - \text{sen}(\alpha - \beta)t] \\
 & + J_2(I)[\text{sen}(\alpha + 2\beta)t + \text{sen}(\alpha - 2\beta)t] \\
 & + J_3(I)[\text{sen}(\alpha + 3\beta)t - \text{sen}(\alpha - 3\beta)t] \\
 & + \dots
 \end{aligned}$$

Como puede verse, la amplitud de cada par de bandas laterales ($\alpha \pm \beta$, $\alpha \pm 2\beta$, $\alpha \pm 3\beta$, ...) queda determinada por factores de la forma $J_n(I)$, que son las funciones de Bessel de primer tipo, de orden n y argumento I . Para un índice de modulación dado I , la función de orden cero $J_0(I)$ determina la amplitud de la portante, la de primer orden $J_1(I)$ el primer par de bandas laterales ($\alpha \pm \beta$), y así sucesivamente.

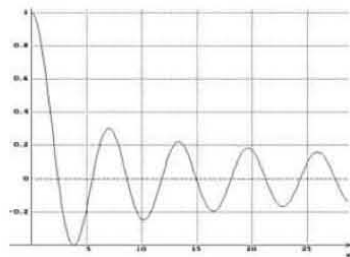


Figura 39. Función de orden cero (Gómez 2009)

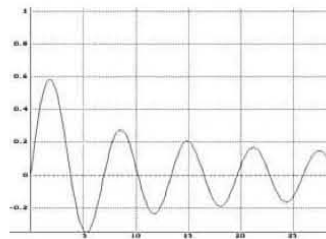


Figura 40. Función de primer orden

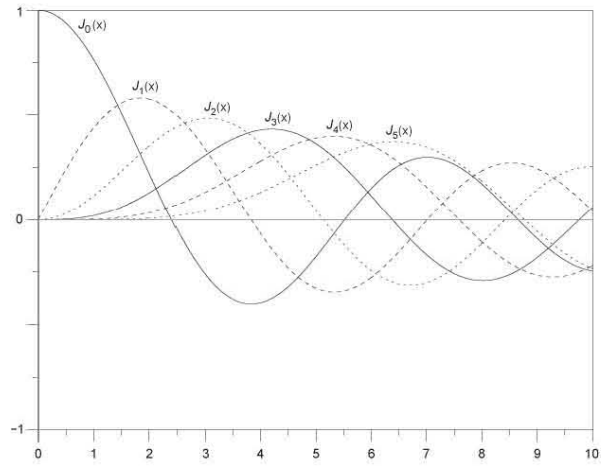


Figura 41. Evolución de las seis primeras funciones de Bessel del primer tipo, las de orden cero a cinco, para índices de modulación de 0 a 10. (Jure 2004)

En la Figura siguiente se ilustra la implementación de la modulación de frecuencia con índice de modulación variable.

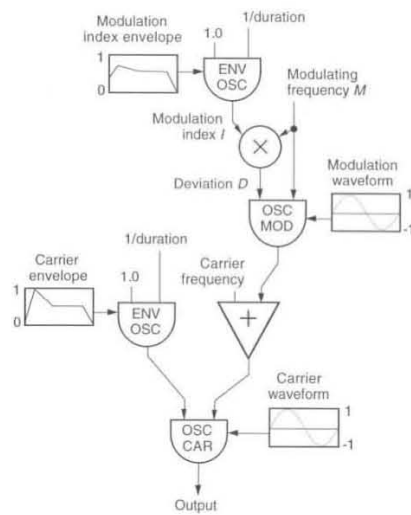


Figura 42 Modulación FM con índice de modulación variable. (Gómez 2009)

La implementación de la figura anterior permite controlar la síntesis FM a través de tres parámetros:

- 1.- La frecuencia portadora (Carrier frequency)
- 2.- La relación C:M, relación de frecuencias portadora y moduladora
- 3.- El índice de modulación I

Estos tres parámetros son eficaces para el control de la síntesis FM, ya que están directamente ligados a características tímbricas:

Variando la frecuencia portadora, desplazamos el espectro hacia los agudos o los graves.

Variando la relación C:M, podemos decidir el carácter armónico (relación de enteros) o inarmónico del timbre, y podemos hacer variar el ancho de las bandas laterales alargándolo (con una relación C:M pequeña) o comprimiéndolo (con una relación C:M alta).

Variando el índice de modulación, tenemos un control directo sobre el número de componentes en las bandas laterales (ya que este número está directamente relacionado a I

y vale aproximadamente $(I+1)$.

El índice de modulación I determina la desviación máxima D de la frecuencia portadora, en función de la frecuencia moduladora M

Índice de modulación, anchura de banda y espectro dinámico.

Chowning estimó que el número de componentes de amplitud significativas en las bandas laterales es función del índice de modulación. Este hecho se ilustra en la Figura 43, que muestra el espectro resultante de una modulación de frecuencia para los valores del índice de modulación 0,1,2,3 y 4. Cuando $I=0$, no hay modulación. Cuando I crece, las bandas laterales aparecen a un lado y otro de la frecuencia portadora, de la cual toman la energía. Para $I=4$, cada banda lateral contiene $(4+1) = 5$ componentes significativas en amplitud. Las otras componentes son tan débiles en amplitud, que las podemos considerar inexistentes. (Gómez 2009)

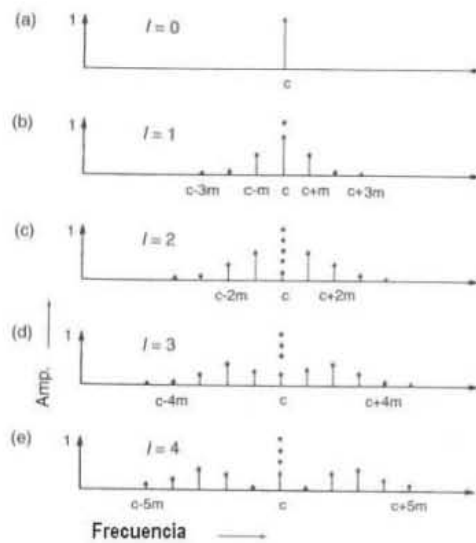


Figura 43 Espectro de FM para índices de modulación I= 0, 1, 2, 3 y 4 (Gómez 2009)

Se puede también deducir una fórmula para la anchura de banda del espectro obtenido, en función del índice de modulación. Sabiendo que una banda lateral contiene (I+1) componentes y que la distancia entre dos componentes vale M:

$$BW = 2 \times (I + 1) \times M = 2 \times M \times (D/M + 1) = 2 \times (D + M)$$

La anchura del espectro obtenido vale entonces aproximadamente 2 veces la suma de la desviación máxima de la portadora (D) y de la frecuencia moduladora (M).

Se puede por tanto concluir que la longitud de banda crece con el índice de modulación, y se puede aprovechar esta particularidad para utilizarlo como parámetro de control para la síntesis de un espectro dinámico (cuyo contenido evoluciona con el tiempo).

De todas maneras, se debe considerar que, al igual que para la modulación AM, algunas relaciones C:M o índices de modulación muy elevados generarán frecuencias que se sumarán al espectro resultante, a veces con inversión de fase. Este resultado no es necesariamente indeseable, ya que el espectro en las frecuencias graves se enriquecerá.

Por tanto, podemos deducir que una variación del índice de modulación I induce a una variación importante del contenido espectral. Cuando I=0, la amplitud de la portadora es máxima y no hay bandas laterales (el efecto de la modulación se anula). Si aumentamos el valor de I, la amplitud de la portadora disminuye, mientras que las bandas laterales aparecen. Este hecho se ilustra en la Figura 44 y 45 en representaciones tridimensionales de una señal en la que se ha hecho variar el índice de modulación de 0 a 2.4 (Fig. 44) y de 0 a 4, en la Figura 45.

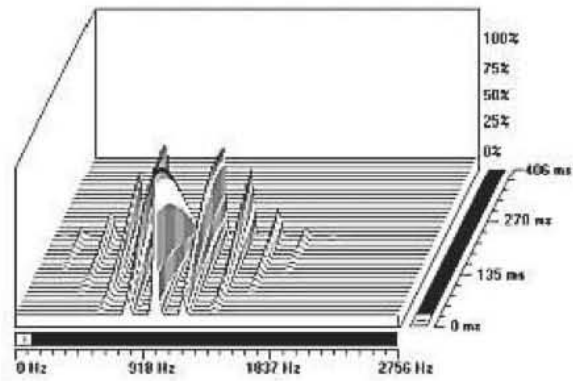


Figura 44 Variación del Índice de Modulación I de 0 a 2.4

En la Figura, el índice de modulación varía siguiendo una envolvente de tipo ADSR. El espectro obtenido es dinámico: al principio del sonido, las bandas laterales contienen 6 componentes importantes, que desaparecen poco a poco a medida que la portadora aumenta su amplitud. Al final del sonido, sólo la portadora está presente. El módulo calcularía la amplitud del oscilador modulador multiplicando el índice de modulación I por la frecuencia moduladora M, lo que nos daría D, la desviación máxima de la frecuencia portadora. Parámetros de control serían el momento de inicio, la duración, la amplitud de la portadora, la frecuencia portadora y la relación C.M.

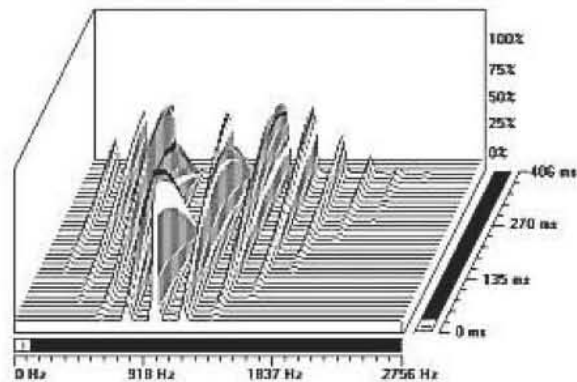


Figura 45. Variación del Índice de modulación I de 0 a 4

2.11 Síntesis de voz

Síntesis de formantes

La voz humana consiste en sonidos generados por la apertura y cierre de la glotis o cuerdas vocales, lo que produce una onda periódica por lo general rica en contenido de frecuencia. Este sonido básico es modificado por el tracto vocal, generando zonas de concentración de la energía espectral, denominados formantes. Un formante consiste en una alta concentración de energía que se da en una determinada banda de frecuencias.

En el caso de la voz humana, para cada sonido usualmente se producen entre tres y seis formantes principales, denotados como F1, F2, F3, etc. Normalmente sólo los dos primeros son necesarios para caracterizar una vocal, si bien la pueden caracterizar hasta seis formantes. Los formantes posteriores determinan propiedades acústicas como el timbre. Los dos primeros formantes se determinan principalmente por la posición de la lengua. F1 tiene una frecuencia más alta cuanto más baja está la lengua; es decir, cuanto mayor abertura tenga una vocal, mayor es la frecuencia en que aparece, F1. F2 tiene mayor frecuencia cuanto más hacia delante está posicionada la lengua, es decir, cuanto más

anterior es una vocal, mayor es, F2.

La síntesis basada en formantes se basa en este fenómeno de la voz humana. La idea es crear zonas de concentración de energía en el espectro del sonido sintetizado, lo que imita el sonido de la voz.

Phase vocoder

Un vocoder, IPA: (nombre derivado del inglés voice coder), o codificador de voz, es un analizador y sintetizador de voz. en su mayoría utilizado para discurso hablado, en el que la entrada se pasa a través de un filtro multibanda.

Originalmente fue desarrollado como un codificador de voz en las telecomunicaciones en aplicaciones de la década de 1930, con la idea de un código para la transmisión de voz. Su uso primario es garantizar la comunicación de radio, donde la voz tiene que ser encriptada y transmitida por un canal de ancho de banda estrecho. La ventaja de este método de *codificación* es que no se envía señal, lo que se envía son envolventes de filtros de banda. La unidad receptora debe ser constituida en el mismo canal de configuración resintetizada a una versión de la señal original del espectro. El vocoder tanto en hardware como en software se ha utilizado extensamente como instrumento musical electrónico. Los Vocoders también se utilizan actualmente en el desarrollo psicofísico, la lingüística, la neurociencia computacional y la investigación de implantes cocleares.

El vocoder examina el habla encontrando su onda básica, que es la frecuencia fundamental, y midiendo cómo cambian las características espectrales con el tiempo grabando el habla. Esto da como resultado una serie de números representando esas frecuencias modificadas en un tiempo particular a medida que el usuario habla. Al hacer esto, el vocoder reduce en gran medida la cantidad de información necesaria para almacenar el habla. Para recrear el habla, el vocoder simplemente revierte el proceso, creando la frecuencia fundamental en un oscilador electrónico y pasando su resultado por una serie de filtros basado en la secuencia original de símbolos.

El vocoder está relacionado con el algoritmo denominado *phase vocoder*, o *vocoder de fase*, aunque esencialmente es diferente de éste. Una *phase vocoder* es un tipo de vocoder que permite escalar una señal de audio tanto en el dominio de la frecuencia como en el dominio del tiempo usando información de fase. El algoritmo permite la modificación del espectro de una señal de audio, mediante lo cual es posible realizar efectos tales como

compresión o expansión temporal y desfase de alturas (*pitch shifting*).

El *phase vocoder* se basa en la Transformada de Fourier de tiempo corto, o STFT. La STFT genera una representación combinada de tiempo y frecuencia del sonido, o lo que se denomina un fonograma, a través de sucesivas FFT en intervalos de tiempo relativamente cortos. En cada segmento de señal (*frame*) es posible modificar la información de amplitud o fase de la FFT, para luego resintetizar el sonido, generando de esta manera variaciones espectrales.

FOF

La FOF (Formant Wave Function Synthesis) fue desarrollada como parte del proyecto *CHANT* del IRCAM, el que estuvo enfocado al desarrollo de técnicas de síntesis que imiten a la voz cantada. El sonido de un generador de impulsos (como equivalente de las cuerdas vocales) procesado a través de un conjunto de filtros pasa bandas (representando las características del tracto vocal), que se corresponden con cada uno de los diferentes formantes de la voz, es el modelo en el que se basa la técnica de síntesis FOF.

Dado que la salida del generador de impulsos puede ser considerada como una secuencia de granos, esta técnica puede ser vista como asociada a la síntesis granular, siendo la diferencia que en la FOF los granos son regulares y sincrónicos, generando de ese modo una forma de onda coherente y periódica. (Dobson, 1992)

2.12 Otros tipos de Síntesis de sonido

FFT

La FFT (o Transformada Rápida de Fourier) es una herramienta utilizada para representar gráficamente a los componentes del espectro de un sonido. El sonido es analizado matemáticamente y reducido a sus diversos parciales en su evolución dinámica en el tiempo. La representación gráfica de una FFT usualmente traza las amplitudes de las bandas de frecuencia en el tiempo, ofreciendo una representación visual de fácil lectura del sonido que esté siendo examinado. (Caesar, 1992)

Síntesis mediante modelado físico

La síntesis basada en modelos físicos se hace a partir de la simulación en una computadora de un objeto físico y sus características. Estos métodos de síntesis generan sonidos describiendo el comportamiento de sus elementos, tales como son: las cuerdas, cañas, labios, tubos, membranas y cavidades que conforman el instrumento. Todos estos elementos, estimulados mecánicamente, vibran y producen perturbaciones, por lo general periódicas en el medio que los rodea.

Modelado Sonoro (Sound Shaping)

Al modelado sonoro se le llama a veces también *esculpir con sonido*. Esta expresión ha sido creada en el glosario como un término amplio que pueda comprender a todos los procesos involucrados en la manipulación espectral y/o temporal de sonidos.

Síntesis mediante distorsión de fase

Basándose en osciladores digitales, trata de reproducir aleatoriamente una forma de onda previamente almacenada, consiguiendo así saltos de fase y, por tanto, adición y/o eliminación de armónicos a la señal de salida.

Modelos basados en partículas

Una gran variedad de síntesis basada en modelos de partículas, sin tratarse de la síntesis granular propiamente tal, puede ser encontrada en la literatura. (Roads, 2001, citado por Cádiz 2008). Algunas de ellas derivan de la síntesis granular, otras de técnicas gráficas, formantes y de la física. Los modelos basados en partículas están basados comúnmente en modelos físicos los cuales usan una descripción matemática del instrumento físico que se desea sintetizar. Un interesante enfoque presenta lo que Cook llamo modelamiento estocástico físicamente informado (PhISEM) Este algoritmo se basa en el traslape pseudo-aleatorio y a la suma de pequeños granos de sonido. Esta técnica considera modelos puntuales caracterizados por las ecuaciones de Newton. Este algoritmo ha sido exitoso en el modelaje de pequeños instrumentos de percusión tal como las maracas y otros instrumentos afines.

Sturm ha trabajado en la sonificación de partículas basado en la hipótesis de Broglie. Como el sonido es una superposición dinámica de frecuencias, existe la posibilidad de establecer una metáfora que relacione la física de partículas y la síntesis de sonidos. De acuerdo con Sturm, pensar en el sonido en términos de la evolución de un sistema de partículas nos otorga una nueva interpretación y una contra parte sonora a los eventos físicos. Bajo este criterio Sturm, deriva sus ecuaciones de transformación sónica.

Modelos basados en dinámica no lineal y caos

Se han propuesto variadas técnicas de síntesis basadas en dinámica no lineal y sistemas caóticos. Uno de los mas importantes trabajos ha sido el de Röbel quien propuso un nuevo modelo para la síntesis de sonido basada en atractores y un método llamado modelo dinámico. (Cadiz, 2008)

Originalmente, este método fue desarrollado para modelar sistemas caóticos dada sólo una serie de muestras obtenidas de la salida del sistema. El modelo para la dinámica de los atractores no, sólo se limita al caso caótico sino que también es útil para modelar sistemas con parámetros fijos. Además, se propuso el método como un modelo de redes neuronales para el habla y la música mediante la aplicación de series de tiempo

Polotti et al. propusieron un método llamado síntesis aditiva fractal, el cual permite separar las componentes estocásticas de la voz para luego poder re-sintetizarlas separadamente.

Síntesis basada en complejidad

El acercamiento tradicional para la síntesis de sonido ha sido intentar generar los sonidos mediante la combinación de elementos simples. En los últimos años, se han hecho evidentes las dificultades para producir sonidos complejos de interés musical y que estos puedan competir con los instrumentos reales en términos de complejidad y expresión. Ya en 1997, Serra evidenció la necesidad de un nuevo foco para la síntesis digital (Serra 1997, citado por Cadiz, 2008).

Una forma natural de abarcar esta problemática es sintetizar sonidos directamente a través de sistemas complejos, esto es sistemas compuestos por muchos agentes individuales, con

un comportamiento complejo e incluso en muchos casos caótico, y no recurrir al modelo de la simplificación. Un esquema de este tipo debiera ser muy útil para sintetizar sonidos provenientes de la naturaleza o que presenten una alta complejidad tanto espectral como temporal.

Capítulo 3. Materiales Timbricos en FM en Csound

En este capítulo, muestro los archivos de sonido cuyos timbres, fueron obtenidos a través de algunos instrumentos de síntesis FM. Ver Apéndice 1, en CD anexo) el cual contiene los códigos de texto que se refieren a la orquesta y a la partitura de cada uno de los instrumentos creados con el programa Csound.

Algunos de ellos fueron modificados, para conformar algunos de los materiales usados en la composición de las miniaturas musicales, que presento en el capítulo siguiente.

3.1 Origen y funcionamiento del programa Csound.

Csound es un generador de sonido basado en unidades programables por el usuario. Es un sistema informático para crear música, es un paquete de software orientado a crear, editar, analizar y componer sonido y música.

En los años sesentas, Max Matthews recopiló algoritmos de generación de sonido y creó el lenguaje Music. Así mismo, del Music1 al Music4. Godfrey Wunham y Hubert Howe expandieron el Music4 a un nuevo programa llamado Music4B. En 1984 Barry Vercoe desarrolló el sistema Music11, es el primer programa desarrollado para microcomputadores. Music11 es el antecesor de Csound.

Csound se hizo con la participación de varios investigadores, programadores y compositores. Estos últimos, con fines musicales se interesaron en la informática. *las contribuciones de Richard Boulanger, Barry Vercoe, Dan Ellis y Bill Gardiner*, son importantes.

Csound incrementa la flexibilidad, es de distribución libre y gratuita, código abierto, libre modificación, corre en las plataformas (Macintosh OS, Microsoft Windows, Linux, Unix; puede funcionar en cualquier ordenador que tenga un compilador "C").

Actualmente se producen nuevas versiones de Csound, con ampliación y mejora de algoritmos, en forma casi constante.

3.2 Estructura y sintaxis de la orquesta y partitura en Csound.

En esta ocasión, nombraré solo algunos aspectos básicos sobre su funcionamiento. Por lo cual recomiendo consultar para mayor información el tutorial del mismo, pues conocer este programa con profundidad, es una tarea ardua y temporalmente larga.

El funcionamiento de Csound implica trabajar con dos clases de archivos para la composición.

El primer archivo es la orquesta (*orc*), que contiene los instrumentos, los cuales son descritos en forma completa, cómo funcionan y suenan

“puede ir desde un oscilador que genere un tono puro (sinusoide) en una frecuencia determinada a un instrumento complejo cuyo timbre varíe estadísticamente”.

El segundo archivo es la partitura (*score*). Es una tabla o gráfica donde se especifica el orden de la actuación de los instrumentos a lo largo del tiempo.

La ejecución de la partitura podrá ser escuchada en tiempo real, y escrita directamente a un archivo en el disco duro. Este proceso completo es llamado renderizado de sonido, análogamente al proceso de “renderizado de imágenes” utilizado en el mundo de los gráficos por ordenador”

Se puede escuchar el archivo de sonido resultante abriéndolo con un editor de sonido.

En Csound, el archivo de la orquesta tiene dos partes principales:

1.- La sección de encabezado, define la frecuencia de muestreo y la tasa de control a las que los instrumentos serán renderizados, así como el número de canales de salida.

```
sr = 44100
```

```
kr = 4410
```

```
ksmps = 10
```

```
nchnls = 1
```

sr = frecuencia de muestreo (de 44.1 Khz. (44100 Hz.)

kr = frecuencia de control

ksmps = Número de muestras en cada periodo de control = sr/kr = variable

nchnls = Numero de canales de la salida de audio (1 = mono, 2= estéreo, 4 = cuadrafónico.)

El valor por defecto es 1

2.- La sección de instrumentos (*score*) es en la cual están diseñados los mismos.

Los instrumentos se definen y diseñan interconectando *opcodes* (códigos de operación) - determinan la tarea a realizar, generan o modifican señales. Estas señales se representan mediante símbolos, etiquetas o nombres de variable que se pueden trasladar de un opcode a otro. Cada instrumento está delimitado por las sentencias Instr. y endin y se representa por un nombre de archivo distintivo

3.3 Descripción del proceso en la construcción de los materiales tímbricos FM en Csound

Los códigos de operación (*opcodes*) para la síntesis FM en Csound son: foscil y foscili

foscil, implementa un algoritmo completo de FM simple, diseñada por John Chowning (oscilador portante y modulante) en un único operador.

foscil: oscilador básico de frecuencia modulada.

La sintaxis de foscil es la siguiente:

```
ar foscil xamp, kcps, xcar, xmod, kndx, ifn, [iphs]
```

Los argumentos tienen el siguiente significado:

xamp - Amplitud

kcps - Frecuencia base, denominador común entre las frecuencias portadora y moduladora

xcar factor que, multiplicado por kcps, da la frecuencia portadora (portadora efectiva = kcps * xcar)

xmod factor que, multiplicado por xcps, da la frecuencia moduladora

(moduladora efectiva = xcps * xmod)

kndx índice de modulación.

ifn número de tabla que usará el operador; debe contener una onda sinusoidal.

lphs (opcional) fase inicial de la onda en la tabla, expresada en fracción de ciclo (0 a 1); un valor negativo hará que no se reinicialice la fase. El valor por defecto es 0.

El operador foscil no trabaja directamente con las frecuencias portadora y moduladora, sino con el cociente c/m , relativo a una frecuencia base (xcps), que funciona como denominador común de ambas frecuencias. Si el usuario quiere controlar directamente la portadora y moduladora, debe usar un valor de xcar = 1.

El índice de modulación es ingresado directamente por (kndx), y el operador se encarga de calcular la desviación de frecuencia correspondiente.

El índice de modulación (en general las variables en el tiempo, van desde 0 hasta 4 o menos), pues determina el reparto de energía acústica en las posiciones parciales dado por $n = 0, 1, 2, \dots$ etc. ifn debe apuntar a una onda sinusoidal almacenada.

La fórmula utilizada para esta aplicación de la síntesis FM es:

$xamp * \cos(2\pi * t * kcps * kndx * xcar * \sin(2\pi * t * kcps * xmod) - \pi)$, suponiendo que la tabla es una onda sinusoidal.

A continuación muestro un ejemplo de la apariencia de la orquesta y la partitura para el opcode foscil de FM en Csound.

Cuadro 2. Orchestra. (**foscil**)

```
sr = 44100
kr = 4410
ksmps = 10
nchnls = 1
; Instrument #1 - a basic FM waveform.
instr 1
  kamp = 10000
  keps = 440
  kcar = 600
  kmod = 210
  kndx = 2
  ifn = 1
  a1 foscil kamp, keps, kcar, kmod, kndx, ifn
  out a1
endin
```

Cuadro 3. Score (**foscil**)

```
; Table #1, a sine wave.
f 1 0 16384 10 1
; Play Instrument #1 for 2 seconds.
i 1 0 2
e
```

foscili

foscili: Oscilador básico de frecuencia modulada, con interpolación lineal.

Comparte la misma sintaxis de foscil

ar foscili xamp, kcps, xcar, xmod, kndx, ifn, [iphs]

así como los argumentos : *ifn, iphs*

foscili difiere de foscil en que el procedimiento estándar de la utilización de una fase truncada por un índice de muestreo es sustituido aquí por un proceso que se intercala entre dos búsquedas sucesivas. Los generadores de interpolación producirán una señal de salida mucho más limpia, pero puede tomar el doble de tiempo de ejecución. La precisión adecuada también puede ser obtenida sin un gran tiempo en la interpolación, mediante el uso de grandes tablas de funciones almacenadas de 2K, 4K o 8K puntos si existe espacio disponible. Ver Apéndice 1

De este primer archivo de sonido llamado foscili se le aplicó cambio en la frecuencia portadora kcar : 50, 70 100 110 220 400 440 600 700 800

Cada uno de estos cambios fue renderizado dando como resultado los siguientes sonidos grabados en archivos de audio aif :

fosciliar50.aif

fosciliar70.aif

fosciliar100.aif

fosciliar110.aif

fosciliar220.aif

fosciliar400aif

fosciliar440aif

fosciliar600aif

fosciliar700.aif

fosciliar800.aif

De estos escogí:

fosciliar70.aif

fosciliar700.aif

fosciliar800.aif

Les apliqué un proceso de *fade in* y *fade out*; de lo cual surgieron:

fosciliar70fadein out.aif

fosciliar700fadeinfadeout.aif

fosciliar800fadein out.aif

Y también escogí:

fosciliar220.aif y fosciliar600aif

modifique al primero el índice de modulación (kndx) a 4 y al segundo a 3

el resultado son los llamados:

foscili 200 x 4.aif y

foscili 600 x 3.aif

Ver Apéndice 1 y escuchar CD anexo.

3.4 Modelos de algunos instrumentos FM

fmb3: para crear sonidos tipo órgano

fmbell: para crear sonidos tipo campana tubular

fmmetal: para crear sonidos tipo metal pesado o percutivo

fmperefl: para crear sonidos tipo flauta percutiva

fmrhode: para crear sonidos tipo piano eléctrico Fender Rhodes

fmvoice: para crear sonidos tipo voz humana

fmwurlie: para crear sonidos tipo piano eléctrico Wurlitzer.

fmb3: síntesis FM para crear un sonido de órgano Hammond B3.

Sintaxis: ar fmb3 kamp, kfreq, kc1 kc2, kvdepth, kvrate, ifn1, ifn2, ifn3, \ifn4, ivfn

fmb3 tiene 5 tablas para la inicialización. Los 4 primeros son los insumos básicos y el último es un oscilador de baja frecuencia (LFO) utilizados para vibrato. La última tabla en general, debe ser una onda sinusoidal.

Las ondas iniciales deben ser:

ifn1 - onda sinusoidal

ifn2 - onda sinusoidal

ifn3 - onda sinusoidal

ifn4 - onda sinusoidal

kamp - Amplitud de la nota.

kfreq – frecuencia de las notas tocadas.

kc1, kc2 Controles para el sintetizador

kc1 - índice de modulación total

kc2 - Crossfade (fusión) de dos moduladores

Algorithm - 4

kvdepth – Vibrador de profundidad

kvrate – tasa de vibración

A este sonido original se le cambio la frecuencia de las notas kfreq a 55, 110 y 120, resultando los archivos:

fmb3freq55.aif

fmb3freq110.aif

fmb3freq220.aif

a estos, se les aplicó un proceso de *fade in, fade out* resultando así, otros nuevos llamados:

fmb3freq55fadein-out.aif

fmb3freq110fadein-out.aif

fmb3freq220fadein-out.aif

Ver Apéndice 1 y Disco Compacto

fmbell: Utiliza la síntesis FM para crear un sonido de campana tubular.

Sintaxis: ar fmbell kamp, kfreq, kc1 kc2, kvdepth, kvrate, ifn1, ifn2, ifn3, \ifn4, ivfn

Inicialización: Todos estos códigos de operación toman 5 tablas para la inicialización. Los 4 primeros son los insumos básicos y el último es el oscilador de baja frecuencia (LFO) utilizado para vibrato. La última tabla en general, debe ser una onda sinusoidal.

kamp - amplitud de la nota.

kfreq - Frecuencia de las notas tocadas.

kc1 kc2 - Controles para el sintetizador:

kc1 - Índice de mod. 1

kc2 - Crossfade (fusión) de dos salidas

Algoritmo - 5

kvdepth - Vibrador de profundidad

kvrate - Tasa de Vibrador

como se puede observar este código es muy similar al anterior lo que cambia es, el instrumento, el algoritmo.

A este sonido original llamado fmbell se le modifico a diferentes frecuencias, de lo cual surgieron los archivos:

fmbellfreq30.aif

fmbellfreq55.aif

fmbellfreq110.aif

fmbellfreq220.aif

fmbellfreq440.aif

fmbellfreq880.aif

fmbellfreq900.aif

fmbellfreq1000.aif

fmbellfreq1100.aif

Escogi:

fmbellfreq55.aif

fmbellfreq110.aif

fmbellfreq220.aif

Les aplique un proceso de *fade in- fade out* y resultaron los llamados:

fmbellfreq55fadein-out.aif

fmbellfreq110fadein-out.aif

fmbellfreq220fadein-out.aif

fmmetal: síntesis FM para crear un sonido tipo metal pesado percutido.

Sintaxis: ar kamp fmmetal, kfreq, kc1 kc2, kvdepth, kvrate, ifn1, ifn2, ifn3, \ifn4, ivfn

lo único que cambia en este código es el instrumento y el algoritmo, que en este caso es 3

A este instrumento **fmmetal** original, solo le apliqué el procedimiento *fade in y fade out*, surgiendo así el archivo:

fmmetalfreq440fadein-fadeout.aif

Ver. Apéndice 1 y CD.

fmpercfl: Síntesis FM para crear un sonido de flauta percusiva.

Sintaxis: ar kamp fmpercfl, kfreq, kc1 kc2, kvdepth, kvrate, ifn1, ifn2, ifn3, ifn4, ivfn

conserva la misma sintaxis que los anteriores así como la inicialización y el performance, cambiando únicamente el instrumento y el algoritmo a 4.

A este sonido llamado fmpercfl se le modifíco la frecuencia, surgiendo así los archivos:

fmpereflfreq55.aif
fmpereflfreq110.aif
fmpereflfreq220.aif
fmpereflfreq440.aif

Escogí:

fmpereflfreq55.aif
fmpereflfreq110.aif

Al primero apliqué *fade in* y *fade out*, así como a solo una de sus partes *fade out*

Al segundo apliqué *fade out* y a este resultante, la función revertir

De ello resultaron los siguientes archivos:

fmpereflfreq55fadeoutfadein.aif
fmpereflfreq55fadeout.aif
fmpereflfreq220fadeout.aif
fmpereflfreq220fadeoutrev.aif

Ver Apéndice y CD.

fmrhode: Síntesis FM para crear un sonido de piano eléctrico Fender Rhodes.

Sintaxis: ar kamp fmrhode, kfreq, kc1 kc2, kvdepth, kvrate, ifn1, ifn2,\ifn, ifn4, ivfn

conserva la misma sintaxis, inicialización y performance que el código anterior, cambia solamente en el instrumento y el algoritmo a 5

a este sonido original llamado fmhode, se le modifíco la frecuencia, resultando los archivos:

fmrhodefreq55.aif
fmrhodefreq110.aif
fmrhodefreq220.aif

fmrhodefreq440.aif

fmrhodefreq570.aif

fmrhodefreq678.aif

Escogi:

fmrhodefreq55.aif

fmrhodefreq110.aif

fmrhodefreq220.aif

a los cuales solo se les aplico la función de normalizar

Ver Apéndice 1 y CD.

fmvoice: síntesis FM para producir sonidos cercanos a la voz humana

Sintaxis: ar kamp fmvoice, kfreq, kvowel, ktilt, kvibamt, kvibrate, ifn1, ifn2, ifn3, ifn4, ivibfn

Aquí la sintaxis cambia como puede observarse, pues aparecen otros parámetros nuevos como son:

kvowel - la vocal que se canta, en el rango 0-64

ktilt - la inclinación del espectro del sonido en el rango de 0 a 99

kvibamt - profundidad de vibrato

kvibrate - tasa de vibrato.

La inicialización se mantiene igual.

A este sonido original llamado fmvoice, solo le modifique la amplitud, de 3000 a 2000, resultando el archivo:

fmvoicekamp2000.aif.

Ver Apéndice 1 y CD.

fmwurlie: Síntesis FM para crear un sonido de piano eléctrico Wurlitzer.

Sintaxis: ar kamp fmwurlie, kfreq, kc1 kc2, kvdepth, kvrate, ifn1, ifn2, ifn3, \ifn4, ivfn

la sintaxis, la inicialización y el performance de este instrumento, se mantienen igual que los anteriores instrumentos al fmvoice que acabamos de ver. Solo vuelven a cambiar el instrumento y el algoritmo a 5. La inicialización se mantiene.

a este sonido original llamado fmwurlie, se le modifico la frecuencia, obteniendo como resultado los siguientes archivos:

fmwurlifreq15.aif

fmwurlifreq30.aif

fmwurlifreq55.aif

fmwurlifreq110.aif

fmwurlifreq220.aif

fmwurlifreq440.aif

fmwurlifreq510.aif

fmwurlifreq720.aif

de los anteriores solo escogí:

fmwurlifreq15.aif

y a este solo le apliqué la función normalizar.

Todos los modelos de instrumentos anteriores tienen la siguiente ficha:

Autor: John Fitch (después Perry Cook), University of Bath, Codemist Ltd. Bath, Uk
Ejemplo escrito por Kevin Conder. Nuevo en la versión 3.47 de Csound.

Capítulo 4. Composición de Miniaturas Musicales (Logic Pro).

En la composición de siete miniaturas musicales, utilicé como herramienta, sonidos obtenidos de algunos instrumentos de síntesis FM diseñados dentro del programa Csound y descritos en el capítulo anterior. Así mismo utilicé otros sonidos que fui coleccionando, de diversas fuentes y a los cuales les había aplicado también, diferentes procedimientos para modificarlos.

En algunas de las miniaturas fueron usados preferentemente timbres FM aunque en otras, estos timbres se fueron combinando con sonidos de síntesis granular u otros.

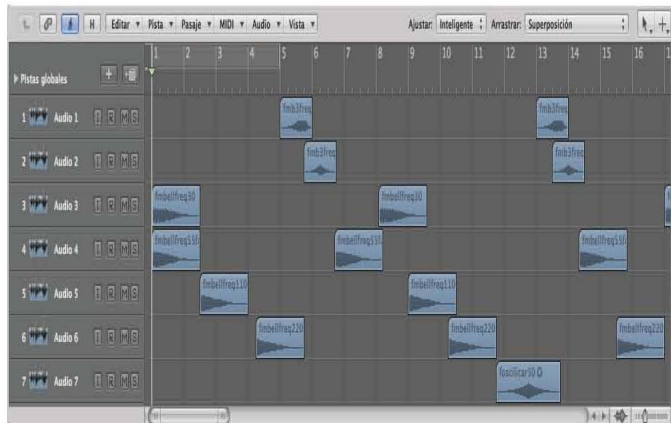
A todos los timbres que fueron resultado de los originales, se les aplicó algunos de los procedimientos básicos como son: normalizar, *fade in*, *fade out*, cortar, pegar, revertir.

Todos ellos fueron transformados de alguna forma y generaron otros nuevos, de los cuales surgen los materiales usados en las miniaturas musicales construidas en el programa Logic Pro.

Logic Pro es una estación de trabajo de audio digital y un software secuenciador MIDI, de aplicación para plataforma Mac OS X.

Fue creado por el desarrollador de software alemán, Emagic. es un producto de Apple, desde 2002. Logic Pro es parte de un paquete de Apple Logic Studio de aplicaciones de audio profesional.

Logic Pro trabaja a través de pistas, en las cuales se pueden distribuir a lo largo del tiempo, cada uno de los materiales sonoros que componen una pieza. Para dar una idea de la apariencia de la ventana principal del programa muestro a continuación una imagen correspondiente a una de las miniaturas que construí.



Cuadro 4. Apariencia de la miniatura No. 1 titulada *Luciérnaga*

A continuación se presentan las características formales que presentan cada una de las miniaturas musicales. Así mismo un comentario personal sobre las sensaciones auditivas que me han producido los materiales, a fin de explicar la forma en que relaciono mi proceso creativo con la imaginación a través del tiempo.

A través de cuadros, relaciono los aspectos que les dan forma.

Miniaturas Musicales:

- 1.- *Luciérnaga*
- 2.- *Bufón*
- 3.- *Fiesta de Mariposas*
- 4.- *Loto en flor*
- 5.- *Corazón*
- 6.- *Rarámuri*
- 7.- *Cuenca*

4.1 *Luciérnaga*

Luz, viaje, flotar, transportarse libre y plácidamente, alumbrar....

Los sonidos que componen esta música, me dieron material para sólo imaginar el movimiento de la luz de la luciérnaga, en su tiempo, su espacio.

Cuadro 5. Estructura

Título	Forma	Duración total min.-Seg.
<i>Luciérnaga</i>	A-B-C-A'	01:59

Cuadro 6. Tiempo

Duración.	1-18 aprox.	18-29 aprox.	29-48 aprox.	48-59 aprox.
Compás 4/4 - 120	18	11	19	11
Duración	Inicio 00:00	00:33	00:56	01:33
Tiempo	Término 00:33	00:55	01:33	01:59
Mín.-Seg.	Total 00:33	00:22	00:37	00:26

Cuadro 7. Materiales

<i>Luciérnaga</i>				
Secciones	A (1-18)	B (18-29)	C (29-48)	A' (48-59)
Materiales Timbricos	fmb3freq55 fadein-out.aif	fmb3freq55 fadein-out.aif	fmb3freq55 fadein-out.aif	fmbellfreq30 fadeout.aif
	fmb3freq110 fadein-out.aif	fmb3freq110 fadein-out.aif	fmb3freq110 fadein-out.aif	fmbellfreq55 fadeout.aif
	fmbellfreq30 fadeout.aif	SultcaseV2 continuo.e.aif	fmbellfreq30 fadeout.aif	fmbellfreq110 fadein-out.aif
	fmbellfreq110 fadein-out.aif		fmbellfreq55 fadeout.aif	fmbellfreq220 fadein-out.aif
	fmbellfreq220 fadein-out.aif		fmbellfreq110 fadein-out.aif	SultcaseV2 fadeout.aif
	foscilicar50 fadein-out.aif		fmbellfreq220 fadein-out.aif	
		foscilicar50 fadein-out.aif		
		foscilicar100 fadein-out.aif		
		SultcaseV2 fadeout.aif		
		SultcaseV2 continuo.e.aif		

Cuadro 8. Comentarios

<i>Luciérnaga</i>
<p>Sección A</p> <p>Sonidos tipo campana a diferentes frecuencias combinados con sonidos tipo flautados, que aún cuando proceden del sonido de un piano eléctrico proporciona también la idea de un sonido cercano a una campana.</p> <p>Sonido ascendente en frecuencia y amplitud de carácter metálico, incisivo.</p> <p>Con la combinación de este último y otro sonido tipo campana se forma un motivo rítmico y melódico que dará unidad a la miniatura.</p>
<p>Sección B</p> <p>Sonidos flautados que en combinación proporcionan sensación de desplazamiento volátil libre y sereno</p> <p>Timbre granuloso Su origen es el archivo titulado SultcaseV2.</p>
<p>Sección C</p> <p>Combinación de los elementos de las secciones A y B</p> <p>Dando realce a todos los materiales, de puede dividir a su vez en dos secciones.</p>
<p>Sección A'</p> <p>Especie de coda que combina sonidos tipo campana y efecto de timbre granuloso. Su origen es el archivo titulado SultcaseV2.</p>

4.2 *Bufón*

Reír, burlar, divertir, jugar

Los sonidos de esta música me sugieren un momento de diversión y juego

Esta estructura de una forma tripartita, manteniéndose exactamente iguales la sección A inicial y A del final. La sección B se caracteriza por mostrar otro ordenamiento de los materiales y por tanto del ritmo de los motivos, así como de la participación de un nuevo timbre: finhodefrecq220.aif

Cuadro 9. Estructura

Título	Forma	Duración total min.-Seg.
<i>Bufón</i>	A- B – A	00:34

Cuadro 10. Tiempo

Duración.	1-7 aprox.	7-11 aprox.	12-18 aprox.
Compas 4/4 - 120	7	4	6
Duración	Inicio 00:00	00:13	00:21
Tiempo	Término 00:12	00:20	01:34
Mín.-Seg.	Total 00:12	00:07	00:13

Cuadro 11. Materiales

Titulo	<i>Buñon</i>		
Secciones	A (1-7)	B (7-11)	A (12-18)
Materiales Timbricos	Fmmetalfreq440 fadein-out.aif	Fmmetalfreq440 fadein-out.aif	Fmmetalfreq44 fadein- out.aif
	Fmpercflfreq220 fadeout.aif	Fmpercflfreq220 fadeout.aif	Fmpercflfreq220 fadeout.aif
	Fmpercflfreq220 fadeoutrevert.aif	Fmpercflfreq220 fadeoutrevert.aif	Fmpercflfreq220 fadeoutrevert.aif
	Fmpercfreq55 fadein-out.aif	Fmpercfreq55 fadein-out.aif	Fmpercfreq55 fadein- out.aif
	Fmhodefrequ110.aif	Fmhodefrequ110.aif	Fmhodefrequ110.aif
	Fmpercfreq55 fadeout.aif	Fmhodefrequ220.aif	Fmpercfreq55 fadeout.aif
	Fmhodefrequ55.aif	Fmpercfreq55 fadeout.aif	Fmhodefrequ55.aif
	Fmwulrlifrq15.aif	Fmhodefrequ55.aif	Fmwulrlifrq15.aif
	Fmpercfreq55 fadeout.aif	Fmwulrlifrq15.aif Fmpercfreq55 fadeout.aif	Fmpercfreq55 fadeout.aif

Cuadro 12. Comentarios

Título: <i>Bufón</i>
Sección A Sonido que por su efecto parece de carácter eléctrico, aunque procede de un sonido tipo metal Sonidos tipo metal que asciende en su amplitud dando la imagen auditiva de un <i>glissando</i> Sonidos tipo cuerda a diferentes frecuencias.
Sección B Sonido que por su efecto parece de carácter eléctrico, aunque procede de un sonido tipo metal Sonidos tipo metal que asciende en su amplitud dando la imagen auditiva de un <i>glissando</i> Sonidos tipo cuerda a diferentes frecuencias.
Sección A Sonido que por su efecto parece de carácter eléctrico, aunque procede de un sonido tipo metal Sonidos tipo metal que asciende en su amplitud dando la imagen auditiva de un <i>glisando</i> Sonidos tipo cuerda a diferentes frecuencias.

4.3 Fiesta de Mariposas

Tiempo de encuentro, comunicación mensajes.

Los sonidos de esta música me sugieren momento de encuentro. Las mariposas alzan al vuelo, se posan, se mueven, hablan

Los sonidos de esta miniatura aparecen en ritmo aleatorio y parece que su estructura esta formada por sólo una unidad en si misma. Los eventos en el tiempo de las mariposas crean un espacio mágico y misterioso.

Cuadro 13. Estructura

Título	Forma	Duración total min.-Seg.
<i>Fiesta de Mariposas</i>	A- B- A´	01:05

Cuadro 14. Tiempo

Duración.	1-13 aprox.	14-21 aprox.	21-33 aprox.
Compás 4/4 - 120	13	7	12
Duración	Inicio 00:00	00:25	00:40
Tiempo	Término 00:25	00:40	01:05
Mín.-Seg.	Total 00:25	00:15	00:25

Cuadro 15. Materiales

Titulo	<i>Fiesta de Mariposas</i>		
Secciones	A (1-13)	B (14-21)	A' (21-33)
Timbre	Fof2corto.aif	Fof2corto.aif	Fof2corto.aif
	Fof2cortorev.aif	Fof2cortorev.aif	Fof2cortorev.aif
	Fof2fadein-out.aif	Fof2fadein-out1.aif	Fof2fadein-out1.aif
	Fof2fadein-out1.aif	Fof2fadein-out2.aif	Fof2fadein-out2.aif
	Fof2fadein-out2.aif	Ifo1.aif	Vibrato.aif
	Vibrato.aif	FM camp1.aif	Ifo1.aif
	Ifo1.aif	FM camp7.aif	FM camp3.aif
	FM camp1.aif	Foscili600x3fadein-out.aif	FM camp5.aif
	FM camp7.aif		Foscili600x3fadein-out.aif
	FM camp3.aif		
	FM camp5.aif		
	Foscili600x3fadein-out.aif		
	Foscili200x4 fadein-outrev.aif		

Cuadro 16. Comentarios

<p>Título: <i>Fiesta de Mariposas</i></p>
<p>Sección A</p> <p>Sonido de tipo flautado con ondulación tonal ligera, también usado en reversa de duración corta.</p> <p>Sonido de tipo flautado con ondulación tonal ligera, más largo. Se mantiene durante toda la extensión de la música.</p> <p>Sonidos flautados en frecuencia fija que ascienden y descienden en amplitud</p> <p>Sonidos de sonido electrónico en frecuencia fija que ascienden y descienden en su amplitud. este tipo de sonidos se encuentra en diferentes frecuencias.</p> <p>Sonido de vibrato flautado que parece entrecortado</p> <p>Sonidos tipo campana cuya resonancia le acerca al sonido de una cuerda a diferentes frecuencias.</p> <p>Sonido flautado pero también de carácter metálico que asciende y decae en frecuencia en el ascenso suena metálico incisivo que termina con un rebote suave y cuyo timbre difícil de caracterizar me sugiere la abertura o cierre de alas de una mariposa</p>
<p>Sección B</p> <p>En esta sección desaparecen algunos sonidos o timbres como el vibrato o algunos sonidos de campanas.</p> <p>Haciendo la atmosfera un poco más transparente</p>
<p>Sección A'</p> <p>En esta sección vuelven a desaparecer otros timbres, las frecuencias de las campanas se cambian por otras, aunque un ritmo aleatorio se mantiene, la atmosfera tímbrica se transforma solo un poco</p>

4.4 *Loto en flor*

¿Y por qué no sentir el aire que roza mi cuerpo?

Los sonidos de esta música me hacen imaginar un espacio abierto entre montañas muy altas; la melodía que emite el oboe, me remite al silencio en ese lugar lleno de paz.

La estructura muestra tres espacios que forman parte del mismo.

Cuadro 17. Estructura

Título	Forma	Duración total min.-Seg.
<i>Loto en Flor</i>	A- B- C	01:23

Cuadro 18. Tiempo

Duración.	1-26 aprox.	26-36 aprox.	36-43 aprox.
Compás 4/4 -120	26	10	7
Duración	Inicio 00:00	00:50	01:11
Tiempo	Término 00:49	01:08	01:23
Mín.-Seg.	Total 00:49	00:18	00:12

Cuadro 19. Materiales

Título	<i>Loto en Flor</i>		
Secciones	A (1-26)	B (26-36)	C (36-43)
Timbre	FM camp1.aif FM camp 2.aif Temaoboe.aif	FM camp 1.aif FM camp 3.aif FM camp 6.aif	FM camp 5.aif FM camp 6.aif FM camp 7.aif Bellrev.aif

Cuadro 20. Comentarios

Título: <i>Loto en flor</i>
<p>Sección A</p> <p>Acompañando a un tema melódico completo ejecutado en un oboe acústico. Al cual se le aplicó reverberación, aparecen sonidos tipo campana que también se asemejan al sonido de una cuerda. Estas campanas aparecen en dos frecuencias distintas</p>
<p>Sección B</p> <p>Esta sección presenta en forma aleatoria y un poco más rápido, solo los sonidos tipo campana, a diferentes frecuencias</p>
<p>Sección C</p> <p>Esta sección se muestran los sonidos tipo campana en reversa, acompañados de un sonido nuevo o extraño. Un sonido cuya aparición no es aleatoria, por el contrario. Aparece en forma constante cada determinado tiempo. Su timbre es de tipo metálico, grave y corto.</p>

4.5 Corazón

Vida, suspiro, respiración, sensación, emoción, razón, muerte, ausencia.

Los sonidos de esta música me hacen imaginar momentos de inicio a la vida como de inicio a la muerte.

Cuadro 21. Estructura

Título	Forma	Duración total min.-Seg.
<i>Corazón</i>	A- B- A'	01:52

Cuadro 22. Tiempo

Duración.	1-17 aprox.	17-32 aprox.	32-42 aprox.
Compás 4/4 -120	17	15	10
Duración	Inicio 00:00	00:50	01:29
Tiempo	Término 00:49	01:29	01:52
Min.-Seg.	Total 00:49	00:39	00:23

Cuadro 23. Materiales

Titulo	<i>Corazón</i>		
Secciones	A (1-17)	B (17-32)	A' (32-42)
Timbre	Pulso EFM.aif Pulsoagudo.aif Vozcorto.aif Pulsocor.aif Pulsocorfadein.aif Pulsocorfadeout.aif Pulsograverebot.aif Vozondulafadein.aif Vozondula.aif SultcaseV2 phasercontinuo.aif SultcaseV2fadeout. aif	Pulso EFM.aif Temavozrev.aif Pulsocorfadein.aif Pulsocorfadeout.aif	Pulsoagudofadeout. aif Vozcorto.aif Pulsocor.aif Pulsocorfadein.aif Pulsocorfadeout.aif Pulsograverebotrev. aif Vozondulafadein.aif

Cuadro 24. Comentarios

Título: <i>Corazón</i>
Sección A Esta sección comienza con un pulso fuerte de especie de tambor grave junto con toque de cuerda también grave. Enseguida se muestra un pulso percutivo grave y constante que por duración se asemeja al imaginario sonido de un corazón. Estos pulso se acompaña con otro muy agudo y otro mucho más grave que aparece con un efecto que proporciona la imagen de un cuerpo pesado pero elástico.

<p>Sección B</p> <p>En esta sección se quedan solamente 3 tipos de pulso graves pero más sordos que acompañan a una melodía cantada por mi y a la que le ha sido aplicado la función revertir.</p>
<p>Sección A'</p> <p>En esta sección desaparece la melodía y vuelven los elementos de la primera sección, pero por un tiempo más corto.</p>

4.6 *Rarámuri*

Danzando sólo danzando

Los sonidos de esta música me hacen imaginar una danza indígena.

Su estructura es un círculo cerrado, representa la unidad.

Cuadro 25. Estructura

Título	Forma	Duración total min.-Seg.
<i>Rarámuri</i>	A	01:52

Cuadro 26. Tiempo

Duración.	1-58 aprox.
Compás de 4/4 -120	17
Duración	Inicio 00:00
Tiempo	Término 01:52
Mín.-Seg.	Total 01:52

Cuadro 27. Materiales

Título	<i>Rarámuri</i>
Sección	A (1-17)
Materiales tímbricos	Metal gong.aif Metal Clang.aif Temararamuri.aif Metalclangcorto.aif Metalclangcortofadeout.aif

El archivo titulado Temararamuri.aif, contiene varios segmentos que fueron grabados en una sola pista. Son pequeños segmentos musicales, que fueron cortados o de alguna manera modificados para conformar las ideas melódicas y rítmicas de toda la pieza. Su fuente primera fue un archivo de audio tomado de un banco de sonidos de banjo.

Este archivo fuente se llama Banjo original.wav y uno de sus archivos resultantes es:

Banjorev.aif

Cuadro 28. Comentarios

Título: <i>Rarámuri</i>
Sección A Sonidos que se acercan a campanas pequeñas de metal que forman un ritmo continuo, fragmento melódico pequeño conformado por varios recortes de sonidos diferentes a partir del sonido fuente y que fueron unidos, formando pequeñas ideas musicales Sonido que se acerca a un efecto de cuerdas, realizado con síntesis granular.

Durante toda la pieza estos tres elementos se van combinando mientras el fragmento melódico inicial se modifica. Pues los recortes de sonidos que lo formaron aparecen en otro orden formando así, fragmentos melódicos nuevos. Todos los elementos se combinan en formas diferentes, manteniendo una unidad durante toda la música.

4.7 *Cuenco*

arcilla, barro, cuerpo

los sonidos de la música me sugieren una posible ceremonia de encuentro místico

Cuadro 29. Estructura

Título	Forma	Duración total min.-Seg.
<i>Cuenco</i>	Forma: A- B- B'- A	01:59

Cuadro 30. Tiempo

Duración.	1-13 aprox.	13-45 aprox.	46-98 aprox.	98-119 aprox.
Compás 4/4 - 120	13	32	52	21
Duración	Inicio 00:00	00:24	01:30	03:13
Tiempo	Término 00:23	01:30	03:13	03:52
Mín.-Seg.	Total 00:23	01:06	01:43	00:39

Cuadro 31. Materiales

<i>Cuenca</i>				
Secciones	A (-13)	B (13-45)	B' (46-98)	A' (98-119)
Materiales Timbricos	Metal Gong. aif	Temaoboeagudogran. aif	Temaoboeagudogran. aif	Pulsocorgravegran. aif
		Metalgonggranlarg. aif	Temaoboeagravgran. aif	Pulsocormediogran. aif
	Metalclanggran. aif	Metalclanggran. aif	Bellopaco.aif	Metal Gong.aif
		Metalgonggran. aif	Bellopacorev.aif	Metalgonggran.aif
		Metalgonggranlargrev .aif	Metalclanggranrev. aif	Granular.aif
		Metal Gong.aif	Metalgonggranlargrev .aif	Metalclanggran.aif
		Metalgonggrancortrev .aif	Metalgonggrancortrev .aif	
	Temaoboeagravgran .aif	Bell medio.aif	Granular.aif	
		Bell grave.aif	Granularrev.aif	
	Metalgonggranlarg. aif		Pulsocorgravegran.aif.	
		Pulsocormediogran.aif		

Cuadro 32. Comentarios

<i>Cuenco</i>
Sección A: Sonidos granulados de metales percutidos y campanas en frecuencias graves y medias
Sección B melodía grave con ondulación de frecuencia, su sonido original es de un oboe. La melodía aparece combinada con metales y campanas a diferentes frecuencias con diferentes niveles de granulación
Sección B' melodía ondulada aguda sola, combinada con la grave, o solamente aparece en su versión grave. Combinando con sonidos granulados mas prolongados pues son los mismos golpes de metales o campanas granulados, pero mostrados con aplicación de reversa
Sección A' pulso grave granulado cuyo efecto produce la sensación auditiva de un movimiento profundo, grave y elástico, este sonido fue llamado latido raro porque surgió de los latidos construidos para la miniatura No. 5
Todo esto aparece en combinación con los mismos sonidos del inicio, golpes de campanas y metales granulados a diferentes frecuencias cerrando de una forma similar a la sección A.

Aún cuando en las ventanas que muestra el programa utilizado, aparece un compás de 4/4 y un tiempo en el metrónomo de 120, la estructura, el ritmo y el tempo de las miniaturas es totalmente libre. El tiempo esta dado más bien por un pulso que tiene que ver con cierta aleatoriedad. Al construir motivos e ideas combinando los diferentes timbres y sonidos, logre producir 7 miniaturas musicales y expresar imágenes sonoras a las cuales me llevaron las sensaciones psicoacústicas que me produjeron los timbres obtenidos.

Conclusiones

El estudio de la música electrónica es un campo de estudio muy amplio, que requiere el aprendizaje de conocimientos referentes a 5 áreas de conocimiento específicas: música, acústica, psicoacústica, electrónica e informática. La música electrónica proporciona una nueva concepción del sonido y por tanto de la música. Las herramientas posibles de ser usadas para la composición musical, son múltiples y multifacéticas.

El timbre de los sonidos, en el ámbito tradicional de los instrumentos y de la orquestación, ocupa uno de los aspectos más trascendentes, importantes e interesantes hoy en día. Pues con ello se define la composición musical en cuanto a su textura. La modificación del timbre del sonido, más allá de las posibilidades de la instrumentación puramente acústica, es uno de los recursos que la tecnología electrónica e informática ha aportado para la composición de música electrónica.

Algunos instrumentos acústicos han generado nuevos recursos modificando en forma considerable el timbre. Sin embargo una de las aportaciones de la música electrónica, para mí más significativa, consiste en la posibilidad de generar cambios en el timbre de un instrumento a través del tiempo, hasta incluso convertirlo en otro timbre tan distante del primero, que este ya no sea reconocible. Puede construirse prácticamente, una especie de continuo tímbrico.

El timbre ha sido estudiado desde el punto de vista de la acústica y de la psicoacústica, utilizando la tecnología electrónica e informática.

El estudio del timbre es un asunto complejo pero fascinante. Ha llevado a importantes investigadores a aportar clarificadoras ideas sobre los determinantes del timbre de un sonido. Aún no se ha dado una definición de timbre cerrada y absoluta, sin embargo el timbre se encuentra determinado por condiciones multifactoriales. Parece que el timbre es el sonido en sí mismo.

A partir de la revisión teórica que se ha hecho sobre el timbre en esta tesis, considero que la definición que más me satisface hasta ahora, es la que Gareth Loy nos proporciona cuando dice: *En cuanto a la investigación perceptual desarrollada, se ha demostrado que la*

distribución de la energía espectral y la variación en el tiempo de esta distribución, provee los determinantes acústicos de nuestra percepción de la calidad sonora.

Un resultado de las investigaciones de William Sethares, que para mí resulta, muy interesante y sorprendente, es la relación que plantea entre el timbre de los sonidos que un instrumento específico produce y la entonación (o escalas) que se pueden ejecutar en ese instrumento. Así mismo la posibilidad, de encontrar timbres para escalas de temperamento igual o arbitrario, es decir, timbres armónicos o no armónicos, estirados o comprimidos.

Ha sido a través de los diferentes tipos de síntesis y del procesamiento de señales, como se puede modificar el timbre de los sonidos; ya sean construidos desde su origen o grabados del exterior. De los tipos de síntesis que se describieron en este trabajo, parecen ser los más favorables, en cuanto a la economía de los recursos informáticos, así como a la variedad y riqueza tímbrica que pueden generar, los siguientes: la síntesis FM, la síntesis granular y la síntesis de voz.

Existen diversos programas de cómputo con los que se puede aplicar procesos de síntesis, para generar timbres nuevos. El conocimiento del manejo de cada uno de ellos, requiere un tiempo considerable de estudio y práctica.

Existe en el mercado, una gran variedad de programas de cómputo para aplicaciones musicales y para la composición, que son a veces bastante accesibles y que no requieren precisamente de bastos conocimientos durante su ejecución, pues de manera intuitiva se pueden lograr timbres y sonidos eficaces para ser utilizados en una composición musical. Sin embargo, también es importante conocer los fundamentos básicos de las disciplinas que contribuyen en el control del comportamiento del sonido y las modificaciones del timbre, pues de esa manera se puede aspirar a predecir y construir sonidos previamente imaginados y deseados de acuerdo a las necesidades de cada compositor.

Los modos de síntesis por modulación en general y en particular la modulación de frecuencia ofrece una manera accesible para iniciar en el estudio de la síntesis del sonido; pues es abundante la literatura que explica sus características y sus posibles resultados. Por otro lado los tutoriales existentes del programa Csound proporcionan una clara y

considerable variedad de ejemplos de timbres posibles de ser obtenidos.

Aún cuando usé, en la composición de las miniaturas musicales algunos timbres obtenidos por otros tipos de síntesis, como fueron la síntesis granular y de voz. Los timbres que más utilice y con los cuales experimente más, son aquellos obtenidos por síntesis FM. Algunos de estos sonidos los escogí porque me pareció interesante que un mismo timbre sea tan parecido y posible de confundir con otro como es aquel que suena como una campana pero también como una cuerda no demasiado tensa o más bien lo suficientemente tensa para producir una altura, pero que en sí misma permite escuchar otras alturas de forma simultánea. Así mismo me llamaron la atención los sonidos que presentan una sensación límite a la distorsión. La utilización y modificación del índice de modulación en la síntesis FM, proporciona aún mayor riqueza y variedad del sonido en el tiempo.

La experimentación en la búsqueda de timbres resulta sumamente interesante porque enriquece inevitablemente el mundo sonoro de cualquier persona que se interese por ello. Necesariamente surge una nueva manera de concebir los sonidos y la música. El estudio de la música electrónica invita a abordar la composición de música acústica de otra manera; añadiendo y combinando las posibilidades de una y de otra. Es interesante por ejemplo, un análisis de la música acústica que se acerca a la sonoridad electrónica, utilizando recursos acústicos contemporáneos de los instrumentos tradicionales. Es importante la investigación sobre los recursos de la música electro-acústica así como una mucha mayor difusión de su ejecución.

La estructura de las miniaturas que construí para ser presentadas en éste trabajo, es totalmente libre. Mi intención fue sólo mantener por un corto tiempo, una lírica musical con sonidos o timbres que nunca antes había utilizado; que me permitiera, de acuerdo a un tiempo definido, sólo y únicamente por una sensación corporal e inmediata, una forma o especie de improvisación, inspirada en la imaginación que me producían los timbres por sí mismos y en la combinación de sus respectivos contrastes.

Al realizar un pequeño análisis de las miniaturas, me hago consciente que continúo manteniendo una cercanía con las formas básicas de la música tradicional acústica pues combino únicamente, a base de sonidos creados y modificados electrónicamente, también temas melódicos tonales o modales que normalmente son usados en la música acústica tradicional. Puedo decir que la búsqueda de nuevos timbres, me ha llevado a modificar y ampliar mi concepción del sonido y de la música; a encontrar explicación a las características de la música occidental hasta ahora. A expresar ideas musicales con los elementos que construí. Aún me queda seguir aprendiendo y profundizando sobre este mismo tipo de síntesis así como de varios de ellos que no fueron tratados con mayor profundidad en esta ocasión. Creo que para cualquier compositor hoy en día es necesario el acercamiento al estudio de este bastísimo campo.

Bibliografía

- 1.- Asuar, José Vicente (1959). En el umbral de una nueva era musical (At the doorstep of a new musical era). Revista Musical Chilena: XIII, no. 64 (March-April). Chile: 11-33 and 54-55. Abstract translations: (English)
- 2.- Barbero Consuegra, Gabriel; Barbero Consuegra, David. Reflexiones en torno a la concepción del timbre en Pierre Boulez. Revista Musicalia Numero 3 2003-2004. Conservatorio Superior de Música "Rafael Orozco" de Córdoba
- 3.- Berlioz, Héctor (reeditado 1991): Treatise on Instrumentation. Dover. U.S.A.
- 4.- Bernard. Auriol, *Tono y Timbre* Música, Terapia y Comunicación, Traducción : Dr. Aitor y Maite Loroño, Revista de Musicoterapia, N° 4, invierno 88-89, PP. 35-39. 1988.
- 5.- Boulanger Richard. Vercoe Barry. The Csound Book Perspectives in Software Synthesis, Sound Design, Signal Processing and Programming. Massachusetts Institute of technology. 2000
- 6.- Boulez, Pierre. Hacia una estética musical. Monte Ávila Editores, 1992. Traducción: Walter Guido. (1966).
- 7.- Cádiz, Rodrigo F. Introducción a la Música Computacional. Centro de Investigación en Tecnologías de Audio. Instituto de Música Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago de Chile, Abril de 2008
- 8.- Caesar Rodolfo. The Composition of Electroacoustic Music. PhD thesis, University of East Anglia, 1992.
- 9.- Casella, Alfredo (1950). La técnica de la orquesta contemporánea. Ricordi, Milán.

- 10.- Chowning, John, 1973. - The synthesis of complex audio spectra by means of Frequency Modulation. *Journal of the Audio Engineering Society*. Reimpreso en: Curtis Roads & John Strawn, eds. 1985 *Foundations of Computer Music*. Cambridge, Massachusetts MIT Press.
- 11.- Copland, Aaron (1939). *Cómo escuchar la música*. Traducción: Jesús Bal y Gay. Fondo de Cultura Económica: 1994.
- 12.- Delalande, Francois. Music analysis and reception behaviors: Sommeil by Pierre Henry. *Journal of New Music Research*, 27:13-66, 1998.
- 13.- Di Liscia, Oscar Pablo. *Generación y procesamiento de sonido y música a través del programa Csound*. Universidad Nacional de Quilmes.
- 14.- Dick, Robert. *The other flute*. Multiple Breath Music Company, 2da. edición, 1989
- 15.- Dodge Charles and Jerse Thomas A. *Computer music : synthesis, composition, and performance*. Schirmer Books ; Prentice Hall International, New York London, 2nd edition, 1997.
- 16.- Donnadieu Sophie. *Mental Representation of the Timbre of Complex Sounds*, chapter 8. Springer, New York, 2007.
- 17.- Fernández-Herrero Olaya - Lorente Miguel. (2006) *Comprobación experimental de la teoría de la consonancia y disonancia musical*. Dpto. de Física – Universidad de Oviedo. PACS: 43.75 - Zz *Revista de Acústica*. Vol. 37. Nos 1 y 2 5
- 18.- Fletcher Harvey. *Some Physical Characteristics of Speech and Music* (1931) *Rev. Mod. Phys.* 3, 258 april 1940.

- 19.- Gareth, Loy. *Musimathics: The Mathematical Foundations of Music, Volume I*.
The Mit Press. Spring of 2006
- 20.- Gareth, Loy. *Musimathics: The Mathematical Foundations of Music, Volume II*.
The Mit Press. Spring of 2007
- 21.- Gómez Gutiérrez, Emilia. *Síntesis por modulación*. Departamento de Sonología;
Escola Superior de Música de Catalunya Curso 2009-2010
- 22.- Gómez Luis Ernesto / González Pedro Mauricio / Valero Luis Pérez. *Color, Música y Sinestesia: Disertaciones Ensayo exploratorio-descriptivo* (Maracay, Venezuela, 1977)
Aproximación a la Crítica musical (2007)
- 23.- Gracia, Xavier. *La teoría de la disonancia: un encuentro entre música y matemáticas*.
Dep. Matemática Aplicada IV Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona. IUMA &
Facultad de Ciencias, Universidad de Zaragoza 30 octubre 2008
- 24.- Grey John M. *An exploration of musical timbre*. Center for Computer Research in
Music and Acoustics Stanford University, february 1975.
- 25.-Grey, J. M. (1977) *Multidimensional Perceptual Scaling of Musical Timbre*. *Journal of*
the Acoustical Society of America, Vol. 61, pp. 1270-1277, 1977.
- 26.- Helmholtz, H. (1954) *On the sensations of tone as a physiological basis for the theory*
of music. Dover Publications. New York
- 27.- Irarrázaval, Pablo. *Análisis de señales*. McGraw-Hill Interamericana, Santiago (Chile),
1999.
- 28.-Jaffè David A. J. *Ten criteria for evaluating synthesis techniques*. *Computer Music*
Journal, 19(1):76-87, 1995.

- 29.- Jost, Peter. Instrumentación. Historia y transformación del sonido orquestal, Editorial Idea Books, S.A. Barcelona 2005. Traductor: Francisco Fernández del Pozo
- 30.- Jure Luis, Escuchando Turenas de John Chowning, Músicas al Sur - Número 1 - Enero 2004. Escuela Universitaria de Música.
- 31.- Kameoka, A. & Kuriyagawa, M (1969). Consonance theory: Consonance of complex tones and its calculation method. J. Acoust. Soc. Am, Vol.45, No6, pp. 1460-1469
- 32.- Károlyi, Otto (1965). Introducción a la Música. Enciclopedia Salvat.
- 33.- Korsakov, Nicolas Rimsky (1946): Principios de orquestación. Ricordi, Buenos Aires.
- 34.- Lach Lau, Juan S. Investigación composicional sobre curvas de disonancia. Centro Multimedia, CNA. 21 y 24 de enero de 2008.
- 35.- Lara Sáenz Andrés. Sobre la evolución del mecanismo de la audición. X Jornadas de historia y filosofía de la Ingeniería, la Ciencia y la Tecnología Pág. 64. Revista de acústica, Vol.36, Nº 1-2 2005. Instituto de la Ingeniería de España y Universidad Politécnica de Madrid, Junio 2004.
- 36.- Lorente, M. (1964) Contribución al estudio de la acústica musical: fundamentos físicos de la tonalidad y de la consonancia." Revista de Ciencia Aplicada. Nº97.
- 37.- McAdams, Stephen. Perceptual scaling of synthesized musical timbres: common dimensions, specificities, and latent subject classes. Psychological Research, 58, 177-192 (1995) Copyright © Psychological Research 1995 Submitted: 3 September 1994. Revised: 17 May 1995

- 38.- Merino de la Fuente, J. Mariano. Concepto moderno de la consonancia musical. . Depto. de Didáctica de Ciencias Experimentales Facultad de Educación, Universidad de Valladolid DP 47014 PACS: 43.75.-z Revista de Acústica. Vol. XXXII. Nos 1 y 2, pp.- 1-4. 2004.
- 39.- Moore, Brian C. J.; Alcántara, José I. Ear and Hearing: The Use of Psychophysical Tuning Curves to Explore Dead Regions in the Cochlea. August 2001 - Volume 22 - Issue 4 - pp 268-278 Articles
- 40.- Moore F. Richard. Elements of computer music. Prentice Hall, Englewood Cliffs,, N.J., 1990.
- 41.- Morgan, Robert (1994). La Música del Siglo XX. Traducción: Patricia Sojo. Akal Ediciones.
- 42.- Olazábal Tirso de. Cualidades del sonido, Acústica Musical y organología, Ricordi Americana, Buenos aires, 1954
- 43.- Perry R. Cook. Real sound synthesis for interactive applications. A K Peters, Natick Mass, 2002.
- 44.- Pierce, John R. The science of musical sound. 1983, Scientific American Books (New York)
- 45.- Piston, Walter (1955): Orchestration. W.W. Norton & Co. Inc. Nueva York, U.S.A.
- 46.- Plomp, R. & Levelt, W.J.M. (1965). Tonal consonance and critical bandwidth. J.Acoust. Soc. Am, Vol. 38, pp. 883-884
- 47.- Polotti Pietro and Evangelista Gianpaolo. Fractal additive synthesis via harmonic-band wavelets. Computer Music Journal, 25(3):22-37, 2001.

- 48.- Polotti Pietro, Menzer Fritz, and Evangelista Gianpaolo. Inharmonic sound spectral modeling by means of fractal additive synthesis. In Proceedings of the 5th Conference on Digital Audio Effects, Hamburg, Germany, 2002.
- 49.- Rasch R. A. y Plomp R. The Perception of Musical Tones. Publicado en: The Psychology of Music, Diana Deutsch, editora. Academic Press, 1982 Traducción de Martín García.
- 50.- Rehfeldt, Phillip. *New Directions for Clarinet*. The New Instrumentation series # 4, 2003.
- 51.- Risset J.C., *La psicoacústica moderna* (1977)
- 52.- Roads Curtis. *The computer music tutorial*. MIT Press, Cambridge, Mass., 4th edition, 1999.
- 53.- Röbel Axel. Synthesizing natural sounds using dynamic models of sound attractors. *Computer Music Journal*, 25(2):46-61, 2001.
- 54.- Roederer, J.G. *The Physics and Psychophysics of Music*, Springer, Berlin. (1995)
- 55.- Samson Séverine, Zalatorre, Robert J.; Ramsay James O. Multidimensional Scaling of Synthetic Musical Timbre: Perception of Spectral and Temporal Characteristics *The Journal of the Acoustical Society of America*, Volume 93, Issue 4, April 1993.
- 56.- Sanguinetti, Horacio. *Como se escucha la música clásica*. Editorial Planeta Arg. Buenos Aires, 2001.
- 57.- Schaeffer, Pierre. *Traité des Objets Musicales*. Editions du Seuil. 1966.
- 58.- Schoenberg, Arnold. *Tratado de Armonía*. Madrid: Real Musical, 1990

- 59.- Serra, Xavier. *Perspectivas actuales en la síntesis digital de sonidos musicales*. Instituto Universitario del Audiovisual Universidad Pompeu Fabra. Rambla 31 08002 Barcelona. 1997.
- 60.- Sethares, William A. Local consonance and the Relationship between Timbre and scale. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1993.Vol. 94, No. 3.
- 61.- Sethares, William A. Relating Tuning and Timbre. Revision of December 1993 article, 1997.
- 62.- Sethares, William A. *Tuning, Timbre, Spectrum, Scale* (2nd ed) Springer, London, 2004
- 63.- Smalley Denis. *Spectro-morphology and structural processes*, pages 61-93. Harwood Academic, 1986.
- 64.- Smith Julius O. Physical modeling synthesis update. *The Computer Music Journal*, 20(2):44-56, 1996.
- 65.- Solis Hugo, *Herramientas Informáticas para la Composición Musical UPF en el curso Escuela Nacional de Música , UNAM. 15–20 de agosto; Conservatorio de las Rosas Morelia 22–27 de agosto 2005*
- 66.- Stanley A. Gelfand (2004), *Hearing- An Introduction to Psychological and Physiological Acoustics* 4th Ed. New York, Marcel Dekker
- 67.- Stanley A. Gelfand (2001), *Essentials of Audiology*. Universidad de Michigan, Thieme, 2001

- 68.- Sturm Bob L. Synthesis and algorithmic composition techniques derived from particle physics. In Proc. of the Eighth Biennial Arts and Tech. Symposium, New London, CT, USA, March 2001.
- 69.- Terhardt, E. Pitch, consonance and harmony J.Acoust. Soc. Am. 55, pp 1061-1069. (1974)
- 70.- Truax Barry. Acoustic communication. Ablex Pub., 2001.
- 71.- Vercoe, Barry.; Media Lab M.I.T. y colaboradores. Manual publico de referencia de Csound versión canónica inglesa editada por John fñtch, Richard Boulanger, Jean Piché y David Boothe. Traducción al español: de la versión 3.55 por Servando Valero. Copyright 1986, 1997
- 72.- Wessel, David. Timbre Space as a Musical Control Structure. Rapport Ircam 12/78, 1978 Copyright © Ircam - Centre Georges-Pompidou 1978, 1999
- 73.- Wessel, David..L. (1973) Psychoacoustics and Music: A Report from Michigan State University. Bulletin of the Computers Arts Society, Vol. 30.
- 74.- Wessel, D.L. and Grey, J.M. (1978) Conceptual Structures for the Representation of Musical Material. IRCAM Technical Report #14.
- 75.- Wessel, David. El Espacio Timbrico como estructura de control musical. Traducción: Pablo Cetta Facultad de Artes y Ciencias musicales, Centro de Estudios Electroacústicos. Universidad Católica Argentina.
- 76.- Wilkinson, Scott R. (1988). Tuning In Microtonality in Electronic Music. Foreword by wendy Carlos. Milwaukee (WI) Hal Leonard Books. ISBN 0-88188-633-5.

- 77.- Windsor W. Luke. Perception and Signification in Electroacoustic Music, chapter 7. Edinburgh University Faculty of Music, 1996.
- 78.- Zwicker . Mediciones de la banda crítica, (1957) (Psicoacústica, Univ.Tec. Munich)
- 79.- http://www.eumus.edu.uy/eme/cursos/comp6/fm/implementación/imp2_foscil.html
- 80.- [http://www. Alegsa.com.ar/Diccionario/diccionario.php](http://www.Alegsa.com.ar/Diccionario/diccionario.php)
- 81.- <http://www.praat.org>
- 82.- <http://www.ears.dmu.ac.uk/spip.php?page=glossaryLang&lang=es>
- 83.- <http://presencias.net/indpdm.html?http://presencias.net/educar/ht1063.html>
- 84.-[http://portal.unesco.org/culture/es/ev.php
URL_ID=13772&URL_DO=DO_TOPIC&URL_SECTION=201.html](http://portal.unesco.org/culture/es/ev.phpURL_ID=13772&URL_DO=DO_TOPIC&URL_SECTION=201.html)
- 85.- <http://www.maginvent.org/files/fiftyycm.pdf>
- 86.http://www.hud.ac.uk/schools/music/humanities/music/newmusic/acoustic_chains.html.

Fe de erratas

En las paginas 90, 93, 96, 99, 101, 103, y 105, en los cuadros que se refieren al tiempo en la primera columna donde dice Duración compás 4/4 – 120, debe decir: Duración número de compases 4/4 - 120

En la Pág. 24, en la segunda línea del párrafo II, donde dice: (mínimos locales de disonancia o consonancias locales)s en muchos de los intervalos; Debe decir: (mínimos locales de disonancia o consonancias locales en muchos de los intervalos

En la Pág. 94 en el cuadro 10 Tiempo, en la fila correspondiente a la línea de tiempo de termino y que corresponde a la tercera sección de la miniatura. que dice 1:34 debe decir 00:34

En la Pág. 105 en el cuadro 29 Estructura. en la columna de Duración total min. – seg. donde dice: 1:59; Debe decir 3:52