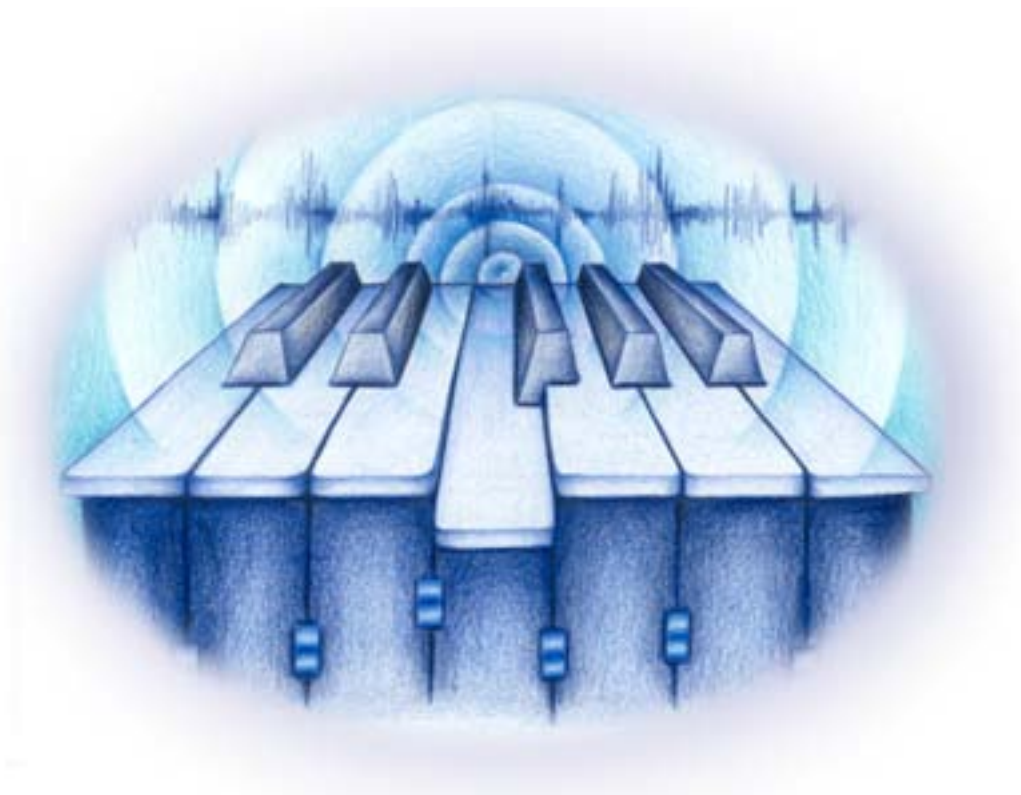


Síntesis digital de sonido



Índice

Etapa 1: Introducción a la síntesis de sonido	5
Introducción	5
¿Qué es un sintetizador?	5
Digital frente a analógico	6
Hardware frente a software	6
Antecedentes históricos	6
Los sintetizadores analógicos	8
Tipos de ondas simples	9
Sintetizadores digitales emuladores del sonido analógico	10
Introducción a la síntesis digital	10
Un poco de historia.....	11
Principales ventajas de los sintetizadores digitales.....	12
Algunas fechas en la historia de la síntesis digital.....	12
Sintetizadores digitales hardware frente a sintetizadores virtuales	13
¿En qué radica la novedad y la importancia de la síntesis por software?	13
Principales ventajas de la síntesis por software:	
precio, versatilidad, experimentación	14
Principales inconvenientes de la síntesis por software:	
potencia, fiabilidad, calidad de sonido	14
¿Qué potencia de cálculo se necesita?.....	14
Enlaces a algunas páginas con programas de síntesis por software.....	15
Conclusión.....	15
Etapa 2: Métodos de síntesis (1)	16
Síntesis aditiva	16
La síntesis aditiva.....	16
Inconvenientes de la síntesis aditiva	17
Síntesis aditiva con técnicas de análisis y resíntesis.....	17
Síntesis sustractiva	18
El <i>vocoder</i>	19
Síntesis por tabla de ondas	20
Limitaciones de la síntesis por tabla de ondas.....	21
Etapa 3: El sintetizador digital por tabla de ondas y el sampler	22
Estructura de un sintetizador moderno	22
Selección de forma de onda	22
Envoltentes.....	22
Parámetros variables	23
Variación temporal de estos parámetros.....	24

Generadores de envolvente.....	25
Combinación de formas de onda	26
Efectos	26
Escalas de afinación.....	27
El <i>sampler</i>	27
Antecedentes del <i>sampler</i>	27
Funcionamiento	28
Los <i>loops</i>	29
Conclusión.....	29
Etapa 4: Métodos de síntesis.....	31
Síntesis por modulación de frecuencia	31
Modulación de frecuencia	31
Operadores	32
Síntesis granular	34

Etapa 1. Introducción a la síntesis de sonido

Introducción

En el módulo anterior se ha visto como una vez que un sonido se ha digitalizado (i.e. se ha convertido en números), es posible aplicarle un sinfín de algoritmos matemáticos que manejen estas grandes ristra de valores numéricos para conseguir cualquier tipo de efecto sonoro imaginable. Sin embargo, siempre partíamos de un sonido ya existente. En este módulo se estudiará un nuevo concepto relacionado con el anterior, que es la posibilidad de utilizar algoritmos matemáticos para generar nuevos sonidos partiendo de cero. Esto es lo que hace un sintetizador digital.

En general, un sintetizador genera sonidos a partir de elementos simples, como por ejemplos señales periódicas.

Un sintetizador digital utiliza algoritmos matemáticos para generar nuevos sonidos.

Antes de estudiar la síntesis digital en particular estudiaremos el concepto de síntesis de sonido en general, así como su historia, que se remonta a principios del siglo XX.

¿Qué es un sintetizador?

- Un sintetizador es un dispositivo que permite *sintetizar* sonido.
- Un sintetizador “puro” no modifica un sonido preexistente, sino que lo genera a partir de la combinación de elementos simples (normalmente señales periódicas y/o funciones matemáticas) que no existen fuera de los circuitos del dispositivo o de las líneas de código del *software*.
- Los sintetizadores permiten obtener una infinidad de sonidos totalmente nuevos, así como, dependiendo del método que utilicen, imitar o reproducir sonidos de instrumentos ya existentes con mayor o menor fidelidad.

Digital frente a analógico

Hoy día se pueden considerar dos grandes tipos o familias de sintetizadores: los **analógicos** y los **digitales**.

- Los **sintetizadores analógicos** utilizan ondas simples generadas por osciladores electrónicos, modificadas con filtros y otros osciladores.
- Los **sintetizadores digitales** generan el sonido a partir de funciones matemáticas y/o de un conjunto de pequeños fragmentos sonoros (secuencias de números) almacenados en su memoria.

Los **sintetizadores analógicos** fueron muy populares durante las décadas de los sesenta y setenta, pero hoy día, ante el imparable avance de los **sintetizadores digitales** en las últimas dos décadas, los analógicos se han convertido prácticamente en piezas de coleccionista.

Hardware frente a software

Centrándonos en los sintetizadores digitales, también podemos dividirlos en dos grandes grupos: los **sintetizadores por hardware** y los **sintetizadores por software**, aunque conceptualmente ambos grupos se basen en los mismos principios.

- Los **sintetizadores digitales por hardware** son en realidad ordenadores “disfrazados” (con su CPU, su memoria, su sistema operativo, etc.) que incorporan potentes chips especializados en procesar sonido (DSP), capaces de realizar decenas de millones de instrucciones por segundo. Suelen incorporar un teclado musical y varios controles, botones, deslizadores, etc. (aunque ninguno es estrictamente obligatorio).
- Los **sintetizadores por software** son programas que aprovechan la tarjeta de sonido del ordenador. Hasta hace poco, estos programas (denominados también a veces *sintetizadores virtuales*) difícilmente podían producir sonido a tiempo real, pero con la creciente potencia de los procesadores actuales, lo cierto es comienzan a aparecer sintetizadores virtuales que rivalizan con cualquier dispositivo *hardware* profesional.

De todo ello, así como de algunos de los diferentes métodos o algoritmos de síntesis existentes, se tratará en este módulo.

Antecedentes históricos

Para encontrar los primeros sintetizadores de sonido debemos remontarnos a 1906, año de construcción del *telharmonium*, por el inventor norteamericano Thaddeus Cahill. El *telharmonium* era un instrumento de doscientas toneladas, dotado de varios teclados similares a los de los órganos, y capaz de recrear entre otros los sonidos del oboe, la flauta, el violonchelo o la trompeta. Aunque su visionario inventor se arruinó a los pocos años, la tecnología utilizada se recuperó décadas después en la construcción de los famosos órganos Hammond.



El *telharmonium*

En los años veinte surgen el *theremin* y las *ondas Martenot*, y durante los años treinta y cuarenta se construyen varios instrumentos eléctricos o electrónicos, algunos de los cuales todavía se utilizan hoy día, como el famoso órgano Hammond (que actualizaba la tecnología inventada para el *telharmonium*) o los pianos eléctricos, ambos utilizados frecuentemente en jazz.



El *theremin*, creado por el ruso Leon Theremin hacia 1920, se distingue de cualquier instrumento tradicional en que no se precisa un contacto directo con el instrumento. En su lugar, el ejecutante desplaza sus manos cerca de dos antenas.

Sin embargo, todos estos dispositivos, que eran evidentemente analógicos y utilizaban osciladores eléctricos como fuente sonora, no pueden considerarse auténticos sintetizadores. La utilización de este término comienza en 1964 con la invención del control por voltaje por parte del ingeniero Robert Moog, que marca el inicio de la época dorada de los sintetizadores analógicos.

Los sintetizadores analógicos

Todos los instrumentos descritos anteriormente utilizaban métodos eléctricos o electrónicos para producir sonido, pero la paleta de sonidos obtenibles estaba limitada por la estructura cerrada de todos estos instrumentos.

En 1964, Robert Moog diseña, a partir de varios osciladores controlados por voltaje (VCO), osciladores de baja frecuencia (LFO), filtros y amplificadores controlados por voltaje (VCF y VCA), cuyo esquema se convertiría en el sintetizador “típico” y que, con pocas variantes, se ha mantenido hasta nuestros días, incluso en los sintetizadores digitales, tal como se estudia en la etapa “El sintetizador digital por tabla de ondas y el *sampler*” de este módulo.

Los sintetizadores analógicos consiguieron durante los años sesenta una paleta de sonidos sintetizados que nunca se habían escuchado hasta el momento, y que incluían sonidos con claras referencias a instrumentos tradicionales, sonidos instrumentales totalmente nuevos o incluso sonidos “no musicales” (similares a viento, explosiones, etc.).

Estos instrumentos solían incorporar un teclado y un gran panel de control desde el cual se podían modificar todos los parámetros en tiempo real, como se puede apreciar en la imagen, por lo que los sonidos obtenibles, amén de infinitamente variados, podían ser también totalmente variables o evolutivos.



Sintetizador modelo Moog System 35, de finales de los sesenta

Hasta finales de los setenta eran instrumentos monofónicos (podían reproducir una única nota a la vez). La generación de sonido se basaba en varios osciladores electrónicos con frecuencias variables entre aproximadamente 1 y 20.000 Hz, y con varias formas de onda simples (sinusoidales, cuadradas, diente de sierra y triangular). Para modificar el timbre, disponían de osciladores de baja frecuencia, filtros y

amplificadores controlados por voltaje, generadores de envolvente, generadores de ruido blanco y otros componentes que podían variar de un modelo o de un fabricante a otro.

Los sintetizadores analógicos utilizan osciladores con cuatro tipos de ondas simples: sinusoidales, cuadradas, en diente de sierra y triangulares.

Tipos de ondas simples

A continuación se describen los tipos de onda básicos más utilizados en los sintetizadores analógicos.



- **Onda sinusoidal**
Es la más simple de todas las ondas. Es una frecuencia pura, que no contiene ningún armónico, por lo que su sonido es el más “delgado” de los cuatro.
- **Onda cuadrada**
Es la onda que tiene el sonido más lleno de las cuatro, debido al gran número de armónicos y a la intensidad de cada uno de ellos. Su sonido se acerca al del clarinete.
- **Onda en diente de sierra**
Esta onda tiene más armónicos que la onda cuadrada, pero éstos tienen menor intensidad. Su sonido, lleno, aunque no tanto como el de la cuadrada, se acerca más al de saxo o al del oboe.
- **Onda triangular**
Después de la sinusoidal, es la que menos armónicos tiene, por lo que su sonido, no demasiado grueso, se sitúa en cierta forma entre la onda sinusoidal y la de diente de sierra, y podría recordar al de la flauta.

Mediante el uso de filtros y osciladores, el método de síntesis que utilizan los sintetizadores analógicos es una combinación de síntesis substractiva y de

varias formas de modulación. Más adelante estudiaremos con mayor detalle estos métodos.

Los últimos años sesenta y toda la década siguiente vieron la eclosión de estos aparatos, de los que comenzaron a fabricarse comercialmente gran cantidad de modelos, y que marcaron toda una época en el pop y el rock de principios de los setenta (Pink Floyd, Emerson Lake and Palmer, Tangerine Dream, Stevie Wonder, etc.).

Sus principales inconvenientes radicaban en su monofonía, su alto precio, su inestabilidad (los dispositivos se desajustaban fácilmente) y en la imposibilidad de guardar configuraciones, lo que dificultaba enormemente su uso en directo: para disponer de varios sonidos accesibles directamente en un concierto, muchos músicos de la época disponían de varios sintetizadores, cada uno programado para una determinada parte.

Todo ello provocó que, cuando a principios de los ochenta surgieron los primeros sintetizadores digitales, el mercado de los sintetizadores analógicos decayera rápidamente. Aún hoy se siguen fabricando algunos instrumentos analógicos, aunque en mucha menor proporción, y destinados a usuarios “exquisitos” a los que no importa pagar precios astronómicos.

Sintetizadores digitales emuladores del sonido analógico

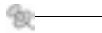
Sin embargo, en los últimos años, la música *techno* y otras variantes de música electrónica han vuelto a poner de moda los sonidos analógicos. Para conseguirlos se fabrican hoy sintetizadores digitales que imitan la estructura de los antiguos aparatos analógicos, y que permiten recrear los famosos sonidos de los años sesenta y setenta. Estos sintetizadores disponen de más de media docena de osciladores de formas de onda simples independientes. Todos los controles del sintetizador se encuentran accesibles desde el panel frontal del sintetizador para facilitar la edición del sonido en tiempo real. El sonido y el aspecto externo de estos aparatos intenta hacernos olvidar que, en el fondo, todo el proceso de síntesis y edición de sonido se realiza a partir de complejos algoritmos matemáticos.

Recientemente, como se volverá a comentar más adelante, han aparecido también muchas recreaciones de sintetizadores analógicos totalmente basadas en *software*.

Pero, ¿qué es la síntesis digital y cómo funcionan los sintetizadores digitales? Esto es lo que se estudiará en el resto de este módulo.

Introducción a la síntesis digital

En el módulo “Principios del sonido digital” se estudió el mecanismo por el cual un sonido se digitaliza, de modo que se convierte en una ristra de valores numéricos. En el módulo “Técnicas de edición y procesado digital del sonido” se estudió cómo permiten modificar o ensalzar estos sonidos varios algoritmos matemáticos al operar sobre estas ristas numéricas. Ahora se estudiará cómo se pueden generar ristas de valores numéricos con propiedades sonoras específicas: **cómo un ordenador puede sintetizar o generar nuevos sonidos**, es decir, sin ningún sonido previo, pero a partir de nuevos algoritmos, fórmulas o funciones matemáticas.



Partiendo de esta idea básica, tal vez no sea demasiado difícil imaginar un primer método para sintetizar sonido digital:

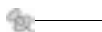
Utilizando la función matemática seno, 44.100 por segundo, con un argumento que varíe periódicamente entre 0 y 2π radianes, y multiplicando el resultado obtenido

(comprendido entre -1 y $+1$), por un valor A comprendido entre 0 y 32.767 (32.767 es la amplitud máxima que puede tener un sonido de 16 bits), obtendremos un sonido sinusoidal de amplitud A y cuya frecuencia dependerá de lo rápido que varíe el argumento en la función seno.

Un poco de historia

De hecho, los primeros intentos de síntesis digital tampoco datan de ayer, ya que son casi tan viejos como los propios ordenadores, e incluso anteriores a los primeros sintetizadores analógicos construidos por Robert Moog a mediados de los sesenta.

Max V. Mathews, padre indiscutible de toda la síntesis digital, generó los primeros sonidos producidos por un ordenador, en los laboratorios de IBM, en 1957. En aquella época, la escasa potencia de aquellos ordenadores hacía totalmente inviable la síntesis en tiempo real, por lo que la estrategia utilizada por Mathews consistió (aproximadamente) en hacer que el ordenador fuera volcando los números computados en una cinta magnética, para que, una vez terminado el proceso, un segundo ordenador leyera esta cinta y mandara los datos a través del primer conversor digital-analógico de la historia (y de allí a un amplificador y unos altavoces...).



Dos años antes, en 1955, Lejaren Hiller y Leonard Isaacson, de la Universidad de Illinois, habían utilizado un ordenador para obtener la primera composición musical generada por ordenador, la Illiac Suite.

En este caso, el ordenador convenientemente programado se había “limitado” a generar una partitura imprimiendo una serie de números (notas) que Hiller e Isaacson transcribieron a notación musical, para que fuera posteriormente interpretada por un cuarteto de cuerdas. Así que ésa es otra historia.

Como curiosidad, se incluye, en las versiones web y CD, la primera composición sonora jamás **sintetizada** por un ordenador: *The Silver Scale* ('la escala plateada'), compuesta por Newman Guttman con la ayuda de Max Mathews, en 1957. En 1957, ¡fueron necesarias varias horas de cómputo para generar un único segundo de estos sonidos!

De hecho, la síntesis digital a tiempo real no fue posible hasta mediados de los setenta, por lo que, como ya se ha comentado, los sesenta y setenta fueron la época dorada de los sintetizadores analógicos. Sin embargo, en centros de investigación y universidades se siguió investigando en este área utilizando los ordenadores *mainframes* más potentes de la época.

Los primeros sintetizadores digitales realmente populares datan de principios de los ochenta (aunque en la segunda mitad de los setenta también se construyeran algunos de los primeros modelos). A mediados de los ochenta, estos modelos digitales desbancarían totalmente a los analógicos.

Principales ventajas de los sintetizadores digitales

En las próximas etapas se estudiarán los pormenores de la síntesis digital. De momento se introducen algunas de las ventajas de los sintetizadores digitales frente a sus parientes analógicos:

- Mayor estabilidad y precisión en el control de los parámetros.
- Algoritmos más flexibles (entre otros muchos algoritmos, pueden incluso emular los utilizados en los dispositivos analógicos).
- Coste menor (conforme descienden los precios de la memoria y de los procesadores).
- Posibilidad de almacenar configuraciones en memoria, para acceso instantáneo a diferentes timbres o sonidos.

Algunas fechas en la historia de la síntesis digital

- 1957-1968: a partir de los trabajos de Max Mathews van surgiendo nuevas versiones de programas para la síntesis digital (Music I, Music II, ..., Music V).
- 1965: primeras digitalizaciones de sonidos reales en los laboratorios Bell.
- 1970: el programa Groove permite por vez primera que un ordenador controle en tiempo real un sintetizador analógico.
- 1977: se comercializa el Synclavier, el primer sintetizador digital comercial. Su precio (varios millones de pesetas) lo hace prohibitivo para la inmensa mayoría.
- 1980: Casio lanza al mercado el VL-Tone, conocido popularmente como *Casiotone*, un pequeño sintetizador digital del tamaño de una calculadora, destinado al público infantil, y que cuesta menos de 5.000 pesetas. Incluye varios sonidos, ritmos preprogramados y un pequeño secuenciador. Arrasa entre los

músicos con ganas de experimentar, y todavía hoy, varios de sus sencillos ritmos se pueden reconocer en algunos anuncios televisivos.

- 1981: E-mu lanza el Emulador, el primer *sampler* digital de menos de un millón de pesetas.
- 1983: surge el MIDI (del cual hablaremos más adelante).
- 1983: Yamaha (tras siete años de investigaciones y pruebas), lanza al mercado el DX7, el primer sintetizador digital profesional realmente popular.

Sintetizadores digitales *hardware* frente a sintetizadores virtuales

Si por razones de potencia de cálculo los sintetizadores digitales tardaron unos años en poder competir con sus homólogos analógicos, algo parecido está ocurriendo hoy día entre los sintetizadores digitales por *hardware* y los sintetizadores por *software*.

La síntesis por *software* fue la primera síntesis digital posible, la que implementó Max Mathews en 1957, y de hecho la única existente hasta bien avanzada la década de los setenta, pero como ya se ha dicho, todos estos procesos estaban muy lejos de poder realizarse en tiempo real.

La llegada de los sintetizadores digitales por *hardware*, ordenadores especiales dedicados y equipados con chips y procesadores especializados en el tratamiento de sonido permitieron afrontar finalmente el tiempo real, cuando éste quedaba todavía muy lejos de las posibilidades de los ordenadores genéricos.

Se ha tenido que esperar cerca de dos décadas a partir de los primeros sintetizadores digitales, para que, a finales de los noventa, los ordenadores convencionales hayan comenzado a ser capaces de sintetizar sonido en tiempo real.

Conviene insistir en que cuando hablamos de síntesis por *software* no nos estamos refiriendo a las tarjetas multimedia, ya que de hecho éstas incorporan chips de síntesis especializados, y pueden considerarse por lo tanto pequeños sintetizadores *hardware* sin carcasa.

Nos estamos refiriendo a programas (escritos en C o en cualquier otro lenguaje) que realizan todos los cálculos y procesos enteramente por *software*, y que sólo aprovechan el conversor D/A de la tarjeta de sonido para salir al exterior.

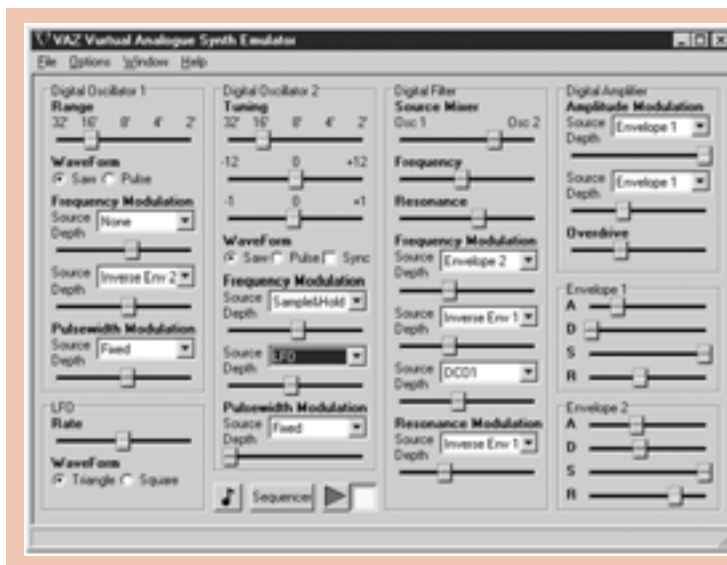
¿En qué radica la novedad y la importancia de la síntesis por *software*?

Como se estudiará más adelante, existen muy variados métodos y algoritmos para la síntesis digital, y la mayoría de los dispositivos *hardware* sólo incorpora uno de ellos, con sus ventajas y sus inconvenientes.

La síntesis por *software* permite implementar cualquier método o algoritmo, que funcionará en cualquier ordenador independientemente de la tarjeta de sonido que posea, siempre que el procesador disponga de la potencia suficiente.

Principales ventajas de la síntesis por *software*: precio, versatilidad, experimentación

- Muchos programas *shareware* o incluso *freeware* ofrecen posibilidades de síntesis innovadoras, experimentales, que ningún fabricante se ha decidido a implementar todavía. Esto abre de repente un universo de posibilidades casi infinito, ya que es como disponer en nuestro ordenador de todos los sintetizadores habidos y por haber. En la imagen se muestra uno de ellos.



Captura de pantalla del sintetizador por software VAZ

Principales inconvenientes de la síntesis por *software*: potencia, fiabilidad, calidad de sonido

- Los programas de síntesis consumen normalmente bastante potencia, por lo que impiden correr demasiadas aplicaciones musicales a la vez.
- Los ordenadores, no es ningún secreto, se “cuelgan” más que los aparatos dedicados. Por lo tanto, los conciertos en directo revestirán de una mayor dosis de “emoción”.

- La calidad final del sonido (ruido de fondo, etc.) dependerá de los componentes de la tarjeta de sonido instalada en el ordenador. Esta calidad (salvo en el caso de tarjetas profesionales) suele ser bastante inferior a la de los componentes utilizados en los sintetizadores dedicados.

¿Qué potencia de cálculo se necesita?

Obviamente, la respuesta depende de muchos factores, como el tipo de síntesis que se desee utilizar, el número de notas máximas que se quiera obtener, el número y calidad de los efectos aplicables (reverberación, filtros, etc.), las aplicaciones que deben correr en paralelo en el ordenador, etc.

Con un Pentium II es posible ejecutar muchos de los programas disponibles.

Con un potente Pentium IV y una tarjeta de sonido de calidad, es posible disponer en un único ordenador de todo un estudio de composición, grabación y posproducción musicales, que hace unos años hubiese costado varios millones de pesetas. Ahondando en esta dirección, están comenzando a aparecer en el mercado tarjetas de sonido destinadas a los usuarios profesionales, que no incorporan ningún método de síntesis en particular, pero sí potentes chips aceleradores (DSP) que permiten sacar el máximo rendimiento de cualquier síntesis implementada por *software*, y con la máxima calidad sonora posible. Todas estas posibilidades se volverán a tratar en el módulo “Grabación y técnicas de estudio”.

Enlaces a algunas páginas con programas de síntesis por *software*

- Virtual Synth Page <http://www.markwhite.com/vsp/>
- Synthzone <http://www.synthzone.com/softsyn.htm>
- Shareware Music Machine:
http://www.hitsquad.com/smm/cat/SOFTWARE_SYNTHESIZERS/

Conclusión

Se ha insistido sobre este tema porque cuando a continuación se empiecen a estudiar diferentes métodos de síntesis digital, deberá haber quedado claro que no se está haciendo ninguna diferencia a si la síntesis se desarrolla por *hardware* mediante un sintetizador dedicado, o si se hace por *software*. Es más, algunos de los métodos que se describirán al final del módulo no han sido implementados todavía en ningún sintetizador comercial (algunos de ellos probablemente no lleguen a implementarse nunca).

El alumno avanzado y con conocimientos de programación en un lenguaje como el C podría incluso hacer sus pinitos en este campo diseñando nuevos programas, aunque, obviamente, esto es algo que está bastante por encima de los niveles de conocimiento desarrollados en este curso.

Etapa 2. Métodos de síntesis (1)

En esta etapa se estudiarán tres de los métodos de síntesis más utilizados:

- Síntesis aditiva
- Síntesis sustractiva
- Síntesis por tabla de ondas

Síntesis aditiva

La síntesis aditiva

Antes del desarrollo de los sintetizadores analógicos a mediados de los años sesenta, los primeros instrumentos electrónicos como el *telharmonium* o el todavía hoy popular órgano Hammond B3 utilizaban ya variantes de la síntesis aditiva.

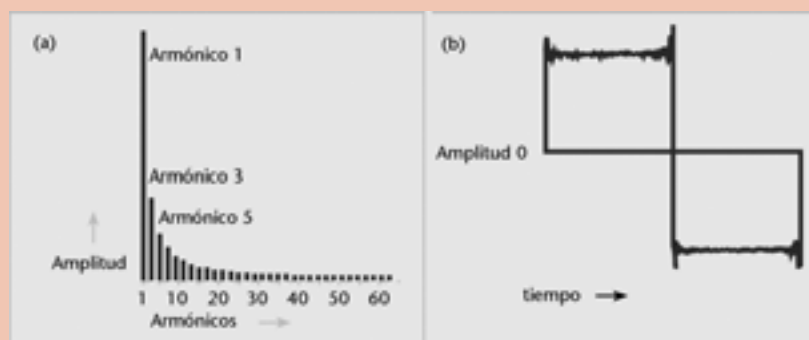
Este método parte de las ideas expresadas en el teorema de Fourier, a partir de las cuales **cualquier sonido periódico se puede descomponer en una serie de ondas sinusoidales de diferentes frecuencias, múltiplos de una frecuencia fundamental.**

Interpretando el principio a la inversa, en teoría resulta posible reconstruir cualquier sonido periódico mediante la combinación correcta de diferentes ondas sinusoidales.

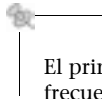
Dada la solidez de esta teoría, y la relativa facilidad con que se pueden generar ondas sinusoidales a partir de varios procesos electrónicos o incluso mecánicos, parece lógico que los primeros intentos de construir sonidos sintéticos utilizaran este método.



Ejemplo de construcción de una onda cuadrada utilizando la síntesis aditiva

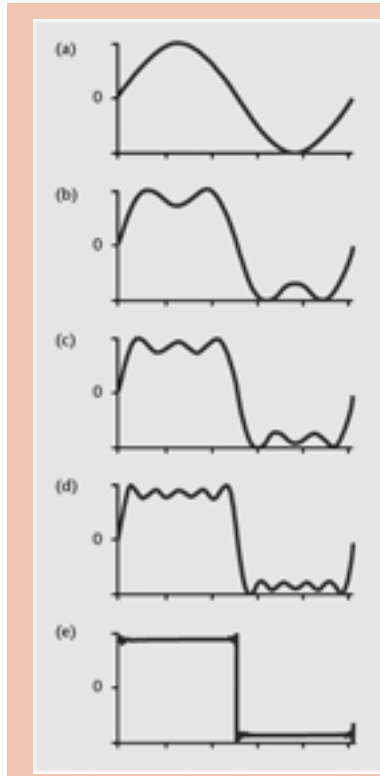


Onda cuadrada (derecha) y su representación espectral (izquierda).



El primer gráfico esquematiza el espectro de frecuencias de una onda cuadrada, obtenido a partir de la transformada de Fourier. Se puede apreciar que este tipo de onda incorpora todos los armónicos impares, aunque con amplitudes cada vez menores.

A continuación se muestra la onda resultante al intentar reconstruir una onda cuadrada a partir de 1, 3, 5, 9 y 101 armónicos respectivamente. Se observa claramente que, conforme el número de armónicos empleados aumenta, el resultado se aproxima cada vez más a una onda cuadrada ideal.



Intento de síntesis de una onda cuadrada en varios pasos. Se puede observar que conforme se suman más armónicos impares, el resultado se asemeja más a una onda cuadrada.

(a) onda con un solo armónico (es por lo tanto una onda sinusoidal). (b) onda resultante de sumar el primer y tercer armónicos. (c) armónicos 1, 3 y 5. (d) armónicos 1, 3, 5, 7 y 9. (e) armónicos impares hasta el 101.

Inconvenientes de la síntesis aditiva

El principal inconveniente de la síntesis aditiva radica en el gran número de osciladores necesarios para obtener sonidos ricos (una decena como mínimo) y en la complejidad que comporta el control sobre todos estos parámetros, ya que como mínimo se debe controlar la frecuencia y la amplitud de cada oscilador. Si además se desean obtener sonidos variables en el tiempo (normalmente los más interesantes), se deberá controlar individualmente y de forma continua la evolución de cada una de estas amplitudes.

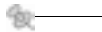
Síntesis aditiva con técnicas de análisis y resíntesis

A causa de estas dificultades, se da la aparente paradoja de que este método, el primero en utilizarse en toda la historia de la síntesis musical, decayó con la irrupción de los sintetizadores analógicos, para resurgir con nueva fuerza con la aparición de los actuales ordenadores más potentes.

El motivo de este “retorno” se debe a que ahora es posible ejercer un control automatizado, basado en el análisis de Fourier, sobre este gran número de parámetros. Esta técnica de control automatizado denominada a veces como de *análisis y resíntesis*, permite sintetizar sonidos, tan similares como se desee a otros ya existentes, a partir de un minucioso análisis de Fourier realizado de estos últimos. El proceso es aproximadamente el siguiente:

1. Mediante un análisis de Fourier, se estudia la evolución del espectro de cualquier sonido en el tiempo (es decir, la amplitud de cada armónico en varios instantes del tiempo) típicamente sobre unas 100 veces/segundo.
2. Con esta información temporal se obtiene la envolvente (evolución de la amplitud en el tiempo) de cada uno de estos armónicos.
3. A partir de la información contenida en este espectro dinámico, se sintetiza un nuevo sonido, sumando en cada instante todos los armónicos con sus respectivas amplitudes. El resultado es un sonido prácticamente idéntico al original, circunstancia que *a priori* puede parecer que no presenta ninguna utilidad. Ahora bien, alterando cualquiera de estos parámetros podremos obtener infinitas variaciones del sonido original.

Realizar minuciosamente este proceso de forma manual resultaría imposible. Hoy puede automatizarse con la ayuda de programas que realizan directamente todos estos pasos y que a continuación permiten modificar cualquiera de estas amplitudes de forma interactiva.



La ampliación de la síntesis aditiva mediante las técnicas de síntesis/resíntesis es un claro ejemplo de una forma de síntesis que no se encuentra disponible en ningún sintetizador comercial, por lo que sólo puede realizarse por *software*.

El manejo de estos programas no es trivial, por lo que no se tratará en este módulo. Sin embargo, se incluye para los estudiantes más curiosos un enlace a uno de los programas

más potentes que implementan este método. El programa (que ya se ha mencionado en la etapa “Otras técnicas avanzadas” del módulo “Técnicas avanzadas y procesado digital del sonido”) se denomina SMS y ha sido realizado por el grupo de tecnología musical de la universidad Pompeu Fabra de Barcelona.

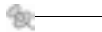
<http://www.iaa.upf.es/sms/dist/download.html>

Síntesis sustractiva

Si la síntesis aditiva parte del principio de que cualquier sonido se puede constituir a partir de la suma de componentes básicos (ondas sinusoidales), la síntesis sustractiva parte de la idea opuesta: dado un sonido muy rico en

armónicos, se pueden obtener muchos nuevos sonidos sustrayéndole parte de estos armónicos.

La síntesis sustractiva necesita menos osciladores que la síntesis aditiva, ya que en principio bastaría con una única forma de onda rica en armónicos y un conjunto de filtros. Por este motivo, es la que (con ciertos añadidos en forma de modulaciones, que se estudiarán más adelante) se implementó en los primeros sintetizadores analógicos durante la década de los sesenta.



La idea es análoga a la de la síntesis sustractiva de color que se utiliza en impresión: se parte de superficies coloreadas sobre las cuales se refleja la luz blanca ambiental, de modo que estas últimas absorben todas las radiaciones y reflejan únicamente la banda de frecuencias correspondiente al color de la superficie.

Aunque menos sistemática que la síntesis aditiva basada en la teoría de Fourier, la síntesis sustractiva también se basa en algunos de los principios físicos que rigen a los instrumentos acústicos. En estos instrumentos, su cuerpo (el tubo de un instrumento de viento, la caja de resonancia de un instrumento de cuerda, etc.) actúa como un filtro que atenúa algunas frecuencias y potencia otras, otorgándole un timbre particular al sonido.

La síntesis sustractiva rigurosa parte del ruido blanco, ya que éste tiene componentes en todas las frecuencias, pero en los sintetizadores analógicos se aplicaba también con cualquier tipo de onda básico que dispusiera de algunos armónicos (ondas cuadradas, triangulares o en diente de sierra).

El vocoder

En la síntesis sustractiva también es posible utilizar técnicas automatizadas de análisis y resíntesis como las descritas en la síntesis aditiva.

En este caso, el proceso consiste en analizar el espectro de un sonido cualquiera (A), para determinar los coeficientes de un conjunto de filtros. Cuando por medio del banco de filtros resultante pasamos ruido blanco (con todas las frecuencias), el sonido filtrado será prácticamente igual al sonido (A) original.

Si en lugar de este ruido blanco pasamos un sonido cualquiera (B), el sonido resultante (C) poseerá características de los dos sonidos (A y B).

Éste es el principio por el que se rigen los *vocoders*, unos dispositivos inventados (en su forma analógica) hacia 1930, en un primer intento de conseguir “máquinas parlantes”.

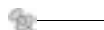
Durante los años setenta, estos dispositivos se utilizaron frecuentemente en música electrónica para obtener voces “robóticas” o voces con ciertas características instrumentales. Hoy día existen sintetizadores por *software* que emulan este proceso, como Cyclonix, un programa *freeware* para Windows, disponible en:

http://www.hitsquad.com/smm/programs/CYLONIX_Vocoder/

Síntesis por tabla de ondas

La síntesis por tabla de ondas es sin duda la más utilizada por los sintetizadores digitales que existen hoy día en el mercado.

A diferencia de los métodos anteriores, que se implementaron en un gran número de dispositivos analógicos, la síntesis por tabla de ondas es un método genuinamente digital.



Lo cierto es que en esta forma de síntesis, los elementos de partida no pueden considerarse tan elementales como en los métodos anteriores, por lo que desde un punto de vista purista, podría considerarse que los sintetizadores que lo utilizan no son *auténticos* sintetizadores. Para simplificar, seremos “flexibles” y pasaremos por alto este matiz.

Los métodos de síntesis anteriores, que parten de osciladores básicos, consiguen crear sonidos nuevos realmente espectaculares, pero son incapaces de imitar convincentemente instrumentos acústicos o sonidos reales.

La síntesis por tabla de ondas tiene por misión solucionar esta limitación, sustituyendo los osciladores de formas de onda simples (cuadrada, triangular, etc.), por pequeños fragmentos de audio digital, extraídos de sonidos reales (o también electrónicos) y almacenados posteriormente en la memoria del sintetizador. Estos fragmentos pueden ser tan breves como un ciclo, ya que el sintetizador se encarga de repetirlos periódicamente (de decenas a miles de veces por segundo).

Recombinando y procesando estos fragmentos en formas similares a las utilizadas en los sintetizadores analógicos (mediante filtros, osciladores de baja frecuencia, etc.), los sintetizadores basados en esta forma de síntesis permiten recrear instrumentos tradicionales con mayor acierto que los métodos vistos anteriormente.

Esta técnica permite muchas variaciones y refinamientos, como la combinación o la alternancia de varios fragmentos en un único instrumento, mediante varios algoritmos. Esto es así porque en los sonidos naturales resulta frecuente que el timbre varíe mucho en el ataque, permaneciendo más o menos constante a continuación, por lo que en muchas ocasiones las dos partes de un mismo sonido (inicio y desarrollo) se almacenan por separado y el sintetizador las combina en tiempo real.

Para enriquecer y hacer más variable el sonido también se utilizan a fondo otros mecanismos (envolventes, filtros y moduladoras), que se describen en la etapa “El sintetizador digital por tabla de ondas y el *sampler*”.

Limitaciones de la síntesis por tabla de ondas

La síntesis por tabla de ondas no es, sin embargo, ninguna garantía de calidad (como algunos fabricantes de tarjetas de sonido que la implementan frecuentemente quieren hacernos creer).

- Un factor decisivo es la cantidad de ROM disponible en el sintetizador o la tarjeta, la materia prima a partir de la cual se construirán todos los sonidos posteriores: mientras los sintetizadores profesionales no suelen utilizar menos de 4 Mb, ¡en algunas tarjetas de sonido esta cifra desciende peligrosamente hasta los 512 Kb! (lo que significa que el “abecedario sonoro” que utiliza el sintetizador sólo ocupa 6 segundos de sonido real).
- Igualmente decisiva es la información contenida en esta memoria: si los fragmentos almacenados no poseen una calidad suficiente o no están bien seleccionados, el resultado sonoro será inevitablemente pobre, independientemente de la cantidad de memoria de que dispongamos. Otro factor importante, e igualmente difícil de evaluar *a priori*, son los algoritmos empleados para combinar y modificar esta información.
- Otro inconveniente es que esta forma de síntesis ofrece resultados más pobres a la hora de crear sonidos totalmente electrónicos. Probablemente por esta razón se hayan puesto de moda en los últimos años, nuevos sintetizadores digitales que emulan a los antiguos sintetizadores analógicos.

En cualquier caso, éste es uno de los métodos más utilizados hoy día en sintetizadores y tarjetas de sonidos. En la etapa “El sintetizador digital por tabla de ondas y el *sampler*” se estudiará con detalle la estructura de un sintetizador actual típico basado en tablas de onda, aunque en la mayoría de los módulos (filtros, envolventes, etc.) se encuentra también en sintetizadores que utilizan otros tipos de síntesis.

Etapa 3: El sintetizador digital por tabla de ondas y el sampler

Estructura de un sintetizador moderno

En los subapartados siguientes se describen los elementos principales que intervienen en un moderno sintetizador digital basado en tabla de ondas. Muchos de estos elementos son también extensibles a otros tipos de sintetizadores digitales.

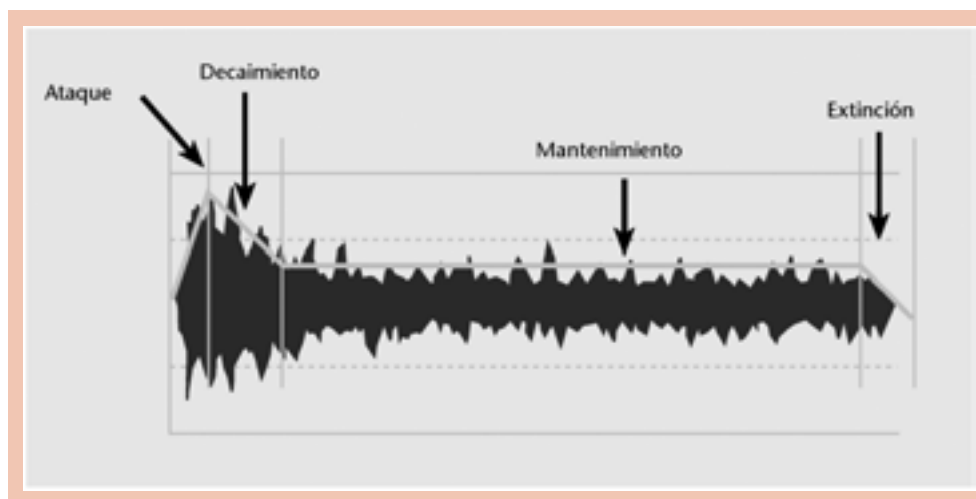
Selección de forma de onda

Este control se suele encontrar con la palabra inglesa *wave* o *waveform* ('forma de onda') y nos permite elegir entre las distintas formas de onda almacenadas en la memoria del ordenador. Todos estos fragmentos son de muy poca duración, debido al alto precio de la memoria. Esta característica no representa ningún problema en instrumentos de percusión, pues la duración del sonido del instrumento corresponderá con la forma de onda guardada. Sin embargo, ¿qué ocurre con un instrumento como el violín, cuyo sonido se puede alargar indefinidamente? Para entenderlo vamos a ver algunas características de la evolución temporal del sonido.

Envolventes

Si analizamos la onda de un sonido de violín podemos distinguir las siguientes fases:

- **Ataque.** El ataque de un sonido de un instrumento se produce en el momento de empezar o atacar la nota. La mayoría de los instrumentos alcanza durante el ataque su máximo nivel.
- **Decaimiento.** Después del ataque se produce una atenuación del sonido. El decaimiento es la transición entre el ataque y el mantenimiento.
- **Mantenimiento.** Corresponde a la zona estable del sonido. Durante el mantenimiento, el timbre y el volumen del sonido permanecen constantes.
- **La extinción o liberación.** Se produce cuando desaparece el sonido de la nota. En el caso del violín es la transición que tiene lugar entre el momento en que se aparta el arco de las cuerdas y la completa desaparición del sonido.



Para alargar la forma de onda del sonido de un instrumento, tendremos que pasar necesariamente por la repetición de un conjunto de muestras, intentando que el bucle de repetición no sea evidente. Para conseguirlo es necesario reconocer la parte del sonido perteneciente al mantenimiento o *sustain*, y buscar un punto de inicio y un punto de final para realizar el bucle (o *loop*). Encontrar estos puntos no es sencillo. Por esta razón los bucles en los sintetizadores ya vienen ajustados por defecto (en el apartado siguiente, dedicado al *sampler*, volveremos a estudiar el tema de los bucles o *loops*).

Parámetros variables

Control de afinación o *pitch*. En principio, para ejecutar las diferentes notas musicales desde un teclado, podría parecer necesario disponer de un fragmento de la forma de onda para cada una de ellas lo que implicaría la necesidad de una gran cantidad de memoria. Con el objetivo de simplificar el muestreo y ahorrar memoria, el sintetizador puede generar varias notas a partir de un único fragmento utilizando varias técnicas de modificación de frecuencia (basadas en las estudiadas en el tercer módulo), teniendo en cuenta que a medida que nos alejamos de la nota original del muestreo, se va distorsionando el timbre original. En este sentido la cantidad de fragmentos utilizados para reproducir un instrumento influirá directamente en la calidad sonora del sintetizador.

TVF o filtro variable en el tiempo. Nos permite el control del timbre mediante un filtro pasabajos. Un control típico de los sintetizadores consiste en la regulación de la frecuencia de corte de un filtro pasabajos. Este filtro eliminará los armónicos de las frecuencias más altas, lo cual producirá como resultado un sonido más opaco.

TVA o amplificador variable en el tiempo. Nos permite variar el nivel del sonido.

Pan. El control de panorama nos permite variar la cantidad de sonido que enviamos en cada uno de los dos canales de salida, para conseguir un sonido estereofónico.

Variación temporal de estos parámetros

Éstos parámetros de *Pitch*, TVF, TVA o *Pan* se pueden controlar mediante osciladores de baja frecuencia (LFO), o generadores de envolvente.

LFO. Son las iniciales de las palabras inglesas *Low Frequency Oscillator*; es decir, oscilador de baja frecuencia. Un LFO genera una onda de una frecuencia muy baja con respecto a la onda del sonido. La onda creada por el LFO no es audible (su frecuencia se sitúa entre unas décimas y una decena de hercios), pero los sintetizadores la utilizan para modificar uno de los parámetros del sonido. Esta modificación será proporcional a la forma de onda generada por el LFO. Un LFO puede tener cualquiera de las formas de onda simples y modificar los siguientes parámetros:

- **Pitch.** Mediante una onda de baja frecuencia generada por un LFO modificamos la afinación del sonido que hay que reproducir. El efecto creado puede utilizarse para simular la vibración que producen los instrumentistas de cuerda frotada cuando hacen temblar el dedo sobre la cuerda y provocan ligeras variaciones en la afinación de la nota.

Si exageramos la profundidad de la modulación del LFO, podemos simular todo tipo de sirenas y alarmas.

TVF. El efecto consiste en variar la frecuencia de corte del TVF de forma proporcional a las variaciones de amplitud de la onda de baja frecuencia suministrada por el LFO. Al variar la frecuencia de corte del filtro pasabajos en un sonido con un alto contenido armónico, se produce un efecto de sordina o de *wah-wah*. Para entender un poco mejor lo que produce este efecto, podemos hacer una prueba: pronunciar de manera sostenida la vocal 'a', y con la mano taparnos y destaparnos la boca con una frecuencia periódica. Al taparnos la boca, la mano actúa de filtro pasabajos, por lo que quita armónicos a la voz y el resultado es un sonido más opaco que cuando la boca está destapada.

- **TVA.** El efecto consiste en variar la ganancia de un amplificador de forma proporcional a las variaciones de amplitud de la onda de baja frecuencia del LFO. En la práctica se puede utilizar para simular el trémolo producido por los instrumentos de metal.

Si exageramos la amplitud del filtro se produce un efecto irreal.

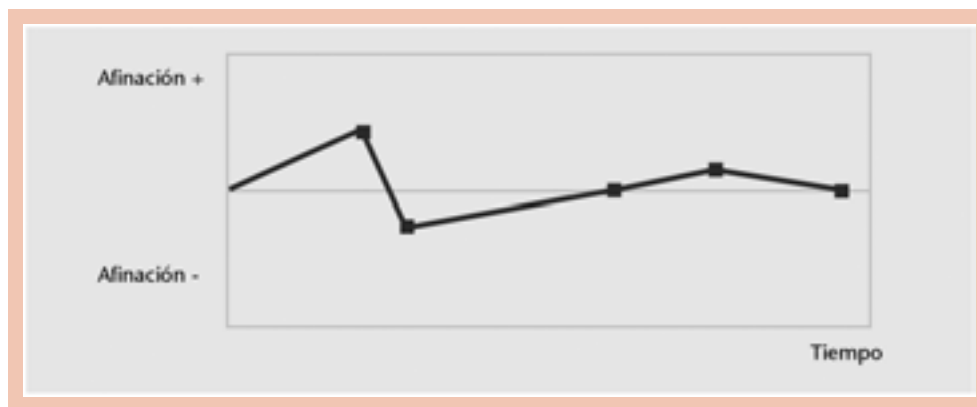
- **Pan.** Este término es una abreviación de panorama. El efecto consiste en variar la cantidad de sonido que se envía a cada uno de los dos canales de audio de forma proporcional a las variaciones de amplitud de la onda de baja frecuencia generada por el VCO. Con este efecto podemos pasar el sonido de un altavoz a otro de forma periódica.

Generadores de envolvente

Nos permiten definir una curva de variación de los parámetros de *Pitch*, *TVf*, *TVA* o *Pan*.

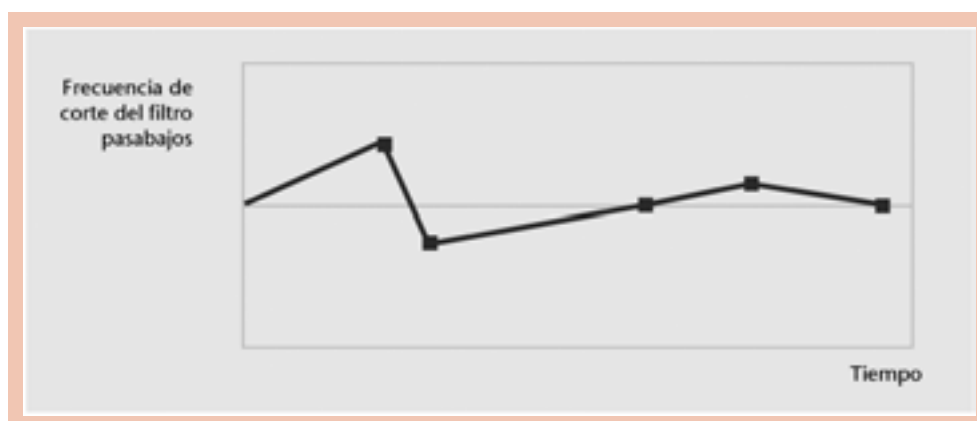
- ***Pitch envelope***. Envolvente de afinación. Este parámetro permite cambiar la afinación del sonido conforme a una curva definida por el usuario. Nos hace posible desafinar una nota a nuestro gusto. Una aplicación típica es la simulación del efecto que logran los guitarristas cuando sostienen una nota estirando la cuerda lateralmente para variar la afinación.

En el gráfico podemos ver un ejemplo de una herramienta de edición digital de envolvente de afinación en el que el usuario define pendientes de afinación.



- ***TVF envelope***. Envolvente de filtrado. Este parámetro permite cambiar la frecuencia de corte del TVF conforme a una curva definida por el usuario. El efecto es el mismo que hemos explicado en el TVF controlado por el VCO, pero ahora, en lugar de tener un efecto periódico (según la forma de la onda del VCO), lo tendremos según la forma de la curva dibujada por el usuario.

Las herramientas de edición de envolvente de filtrado suelen tener el mismo aspecto que las otras herramientas de edición de envolventes de afinación, amplitud, etc.



- **TVA *envelope*.** Envolvente de amplitud. Este parámetro permite cambiar la ganancia del TVA conforme a una curva definida por el usuario. Se trata de un recurso necesario para imitar sonidos como por ejemplo el del piano, que tiene un ataque muy fuerte y un decaimiento mucho más suave.

Combinación de formas de onda

Para conseguir reproducir sonidos de instrumentos acústicos con mayor naturalidad, los sintetizadores recurren a la utilización de diferentes formas de onda, que se pueden combinar de las siguientes formas:

- **Sumadas.** Las notas producidas por algunos instrumentos están acompañadas de una parte de ruido producido por los mecanismos del mismo instrumento o ejecutante. Por ejemplo, el sonido de un piano viene acompañado del ruido de los mecanismos de los martillos, y el de una flauta por un soplido inicial. Para conseguir un efecto real es necesario sumar esta parte inicial de ruido al sonido del instrumento.

Soplido + Nota musical = Sonido real

- **Con diferentes retardos.** En algunas ocasiones interesa encadenar diferentes formas de onda. Esto puede hacerse aplicando un retardo a las diferentes formas de onda para que vayan apareciendo en función del tiempo. En un violín tenemos, en primer lugar, la muestra del ataque con el arco a la cuerda, y a continuación encadenamos el sonido del mantenimiento o *sustain*.

Ataque + mantenimiento = Sonido real

- **Con diferentes intensidades de ataque de la nota.** Algunos instrumentos varían mucho el timbre en función de la intensidad. En este caso será necesario disparar diferentes formas de onda según la intensidad con que se ha pulsado la tecla, y se dice que los sonidos se estructuran en diferentes capas (o *layers*). Cuando un bombo se golpea con contundencia o con suavidad, la membrana se comporta de formas muy distintas; por lo tanto, en función de la velocidad con que se pulsa la tecla del sintetizador se activarán muestras distintas.
- **Con diferentes eventos.** Algunos instrumentos producen un determinado sonido en el momento de la extinción o *release*. En estos casos será necesario disparar un sonido cuando dejamos de apretar la tecla.

Efectos

La mayoría de los sintetizadores incorpora procesadores de efectos. Con ellos podremos añadir a los sonidos reverberaciones, *chorus*, *flangers*, *delays*, distorsiones,

compresiones y, en definitiva, todos aquellos efectos que podemos encontrar en un módulo procesador multiefectos.

Escalas de afinación

Nos permiten escoger entre las distintas escalas de afinación utilizadas por los diferentes instrumentos y las distintas culturas. Además, suelen ofrecer la posibilidad de editar escalas de afinación personalizadas.

El *sampler*

Sample en inglés significa muestra, por lo que podemos decir que un *sampler* es un muestreador. Aunque popularmente *sampler* y sintetizador se consideren términos dicotómicos, la técnica básica del *sampler* no es muy diferente de la utilizada en los sintetizadores de tablas de onda; lo que estos últimos resuelven con ingenio (almacenando muy breves fragmentos sonoros que constituyan una suerte de abecedario sonoro), el *sampler* lo remedia recurriendo directamente a la fuerza bruta, es decir, utilizando mayores cantidades de memoria.

El sintetizador cuenta con un número finito de formas de onda de sonido almacenadas en una memoria ROM (sólo de lectura). Un *sampler* no cuenta con ninguna forma prealmacenada, pero es en cambio un sistema abierto en el que el usuario puede introducir cualquier forma de onda y usarla como sonido de un instrumento musical (normalmente los sonidos se dispararán con un teclado musical).

Por otra parte, mientras que los *samplers* primitivos se limitaban a *reproducir* los sonidos digitalizados, los instrumentos actuales ofrecen posibilidades de modificación comparables a las de cualquier sintetizador.

La combinación de formas de onda, edición y muestreo no son tareas fáciles. Por esta razón, los *samplers* permiten cargar bibliotecas de sonidos que además de las formas de onda contienen todos los parámetros de programación del *sampler* para que los sonidos queden correctamente distribuidos en el teclado y listos para trabajar. El número de bibliotecas de sonidos existentes y la compatibilidad entre bibliotecas de diferentes fabricantes es un factor que hay que tener muy en cuenta a la hora de adquirir un *sampler*.

Antecedentes del *sampler*

Incluso un instrumento tan genuinamente digital como el *sampler* tiene sus precursores analógicos. El invento, de finales de los sesenta, se llamaba *Mellotron*, y tuvo su época dorada durante el *rock* sinfónico. Con el aspecto de un órgano

electrónico, incorporaba, debajo de cada tecla, un pequeño bucle de cinta magnetofónica y un cabezal. En sus tripas ocultaba decenas de “pletinas de casete”, y era, lógicamente, muy caro y difícil de mantener.

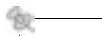
Los primeros *samplers* digitales fueron bastante más prácticos, pero no mucho más baratos. El Fairlight CMI, que tenía una resolución de 8 bits y una memoria de 128 Kb, costaba, cuando apareció en 1979, más de dos millones y medio de pesetas.

Funcionamiento

El *sampler* almacena en su memoria sonidos digitalizados, pero igual que sucede con el sintetizador por tablas de ondas, no almacena un sonido para cada altura diferente, pues la cantidad de memoria requerida sería exorbitante. En su lugar, para reproducir un sonido a diferentes alturas, los *samplers* pueden utilizar dos estrategias: modificar la frecuencia de salida o convertir la frecuencia de muestreo mediante interpolación en tiempo real.

- **Modificación de la frecuencia de salida:** si un sonido digitalizado a 44.100 Hz se reproduce a 22.050 Hz, la frecuencia resultante será la mitad (sonará una octava más grave y su duración será el doble). Para valores intermedios (un semitono, dos semitonos, etc.) el factor de corrección será lógicamente menor (y estará comprendido entre 1 y 2).
- **Conversión de la frecuencia de muestreo por interpolación:** si al reproducir un sonido sólo se lee una muestra de cada dos, la frecuencia resultante será el doble (sonará una octava más aguda y su duración será la mitad). Para intervalos menores, en lugar de saltar una de cada dos muestras, se salta una de cada *N*. Asimismo, si se desea que suene más grave, en lugar de saltar muestras, el *sampler* repetirá algunas.

En ambos casos, a medida que aumenta este factor de corrección, el sonido resultante se vuelve cada vez más artificial. Por ello, cuando se desea que un *sampler* emule instrumentos acústicos con calidad y verosimilitud, es necesario introducir en la memoria varios sonidos, correspondiente cada uno a diferentes alturas del instrumento original (un sonido cada cuatro o cinco semitonos, por ejemplo).



Todo lo anteriormente expuesto es la causa de que el proceso de creación de instrumentos realistas sea tedioso y complicado, por lo que es muy frecuente utilizar instrumentos creados por profesionales y disponibles en librerías de sonidos en forma de disquetes o de CD-ROM.

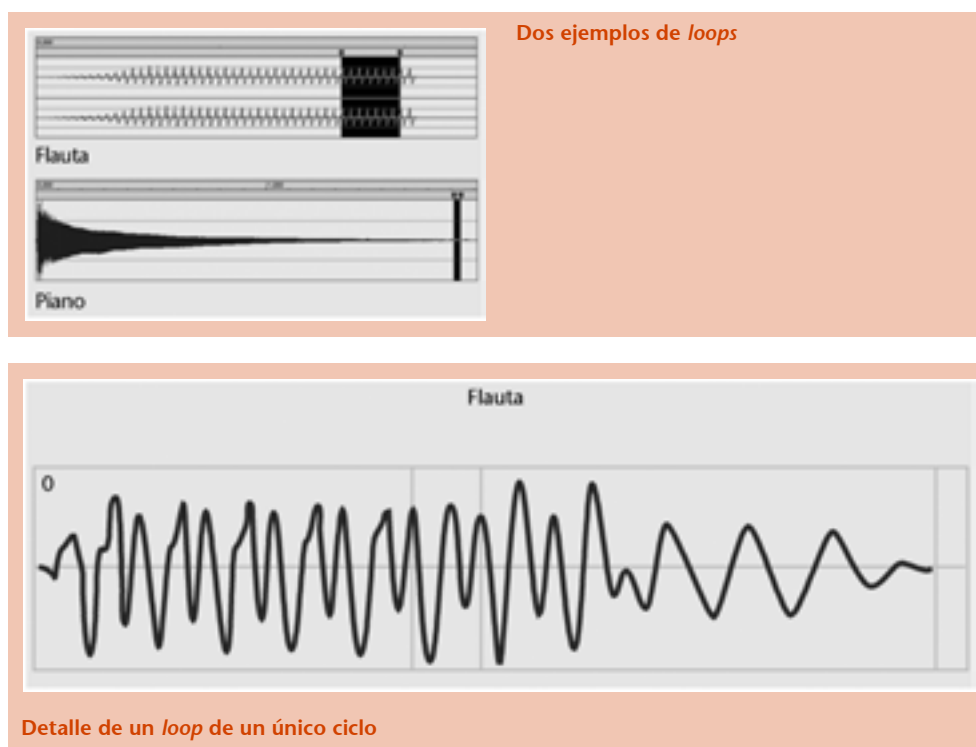
La idea es clara: para obtener un sonido de piano mejor del que podamos encontrar en una librería

necesitamos: (1) un buen piano de cola, (2) un buen micrófono y unas condiciones de grabación óptimas, (3) mucho tiempo y paciencia.

Sin embargo, estas consideraciones no son tan importantes cuando se desean crear instrumentos no realistas y personales; en este caso, las posibilidades creativas del *sampler* permanecen imbatidas.

Los loops

La creación de *loops* o bucles es una técnica fundamental en el manejo de los *samplers*, ya que por mucha memoria de que se disponga, los sonidos almacenados no pueden ser “infinitamente” largos. Cuando se desee que un instrumento (como un órgano o un saxo) suene indefinidamente mientras se mantenga activada una tecla, será necesario definir dos puntos, inicio y final del bucle. De esta forma, el fragmento marcado se repetirá automáticamente durante el periodo de sostenido del sonido. En la siguiente figura se pueden apreciar en oscuro los bucles aplicados a sendos sonidos de piano y de flauta, mientras que en la figura inferior se muestra con mayor detalle un fragmento al que se ha aplicado un *loop* de un único ciclo (las dos líneas verticales centrales).



Otra posibilidad de los *loops* es la de crear fragmentos rítmicos repetitivos. En estos casos, los puntos inicial y final coincidirán probablemente con el inicio y final del fichero de sonido. De cualquier forma, la creación de bucles perfectos (que no se noten) es una tarea difícil que requiere paciencia y experiencia.

Conclusión

Con un *sampler*, absolutamente cualquier sonido (instrumental tradicional, electrónico, vocal, animal, ruidos de nuestro entorno, etc.) se puede convertir en un instrumento musical. El dominio del *sampler* es difícil y tiene tanto de arte como de ciencia, pero sus posibilidades creativas son tan amplias que, quien pruebe uno, no querrá abandonarlo nunca más.

Si hasta hace poco éstos eran instrumentos muy caros destinados al mercado profesional, el abaratamiento de la memoria y de los chips VLSI (*Very Large Scale*

Integration) ha logrado que, desde 1995, existan tarjetas de sonido para PC que permiten trabajar como *sampler* mediante la ampliación de memoria RAM con SIMM convencionales, o aprovechando directamente parte de la memoria del ordenador. Aunque, lógicamente, estos productos ofrecen prestaciones algo inferiores a aquellos que valen diez veces más, sus posibilidades no son en absoluto desdeñables.

Etapa 4: Métodos de síntesis

Síntesis por modulación de frecuencia

En los años 70, John Chowning introdujo los detalles técnicos de la síntesis de sonido por modulación de frecuencia en sintetizadores digitales. Los resultados posteriores de John Chowning en este terreno fueron tenidos en cuenta por Yamaha, que de forma parcial y con limitación de prestaciones, se basó en ellos para la construcción de la larga serie de sintetizadores digitales iniciada con el popular DX7 en 1983.

Si la síntesis aditiva se resume en la suma de funciones seno y/o coseno, la síntesis de sonido por modulación de frecuencia se lleva a cabo por la alteración de la frecuencia instantánea de una función (seno, coseno u otra función periódica más compleja), según el comportamiento instantáneo de otra función periódica de frecuencia y amplitud dadas.

Notad que la síntesis de sonido por modulación de frecuencia no depende de que el sintetizador sea digital o analógico: en un dispositivo analógico, la estructura determinada por un oscilador que controla por voltaje la frecuencia de otro genera sonido por modulación de frecuencia. Los efectos sobre el timbre se hacen especialmente notorios cuando la frecuencia del oscilador modulante supera los 20 Hz.

Modulación de frecuencia

Sean por ejemplo, dos funciones coseno:

$$y = A_p \cos(2\pi f_p t + \phi_p) \text{ e } y = A_m \cos(2\pi f_m t + \phi_m)$$

La modulación de frecuencia de la primera señal *–portadora–* por la segunda *–modulante–* se formula según una nueva función:

$$y = A_p \cos(2 \cdot f_p t + A_m \cos(2\pi f_m t + \phi_m) + \phi_p)$$

A_p y f_p son, respectivamente, la amplitud y la frecuencia de la señal *portadora*. A_m y f_m , la amplitud y la frecuencia de la señal *modulante*.

En la señal de salida, la modulación de la frecuencia produce muchos parciales que no están en la señal portadora ni en la modulante. Si las dos funciones son seno o coseno, las frecuencias de los parciales obtenidos se determinan por la relación entre

las frecuencias de la señal portadora f_p y f_m . Las frecuencias de los parciales obtenidos por modulación de frecuencia son f_p , $f_p + f_m$, $f_p - f_m$, $f_p + 2f_m$, $f_p - 2f_m$, ..., ..., $f_p + if_m$, $f_p - if_m$, ..., ..., etc.



Armonicidad

Un valor de interés para la modulación de frecuencia es la *armonicidad*. Viene dado por relación entre las frecuencias de la señal portadora y la modulante (f_m/f_p). Determina el valor relativo de las frecuencias presentes en la señal de salida, y también si se encuentran en relación armónica o inarmónica.

La intensidad relativa de los parciales depende de la amplitud y de la frecuencia de la señal modulante. Esto influye en la sensación de brillo y plenitud en el timbre. Los valores de intensidad de los pares de parciales ($f_p + if_m$ y $f_p - if_m$) se obtienen por medio de la aplicación de las funciones de Bessel del grado correspondiente a la fórmula dada anteriormente para la modulación de frecuencia.



Índice de modulación

Otro valor de interés utilizado en los dispositivos de modulación de frecuencia es el denominado *índice de modulación*. Viene dado por la relación (A_m/f_m) entre la amplitud y la frecuencia de la modulante. Afecta a la intensidad del color del sonido. Notad, pues, que cuanto mayor es la frecuencia de la modulante, mayor debe ser también su amplitud para obtener el mismo índice de modulación y, por lo tanto, parecida sensación de brillo.

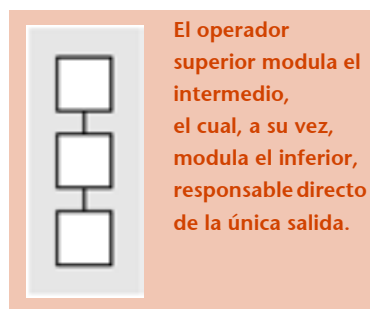
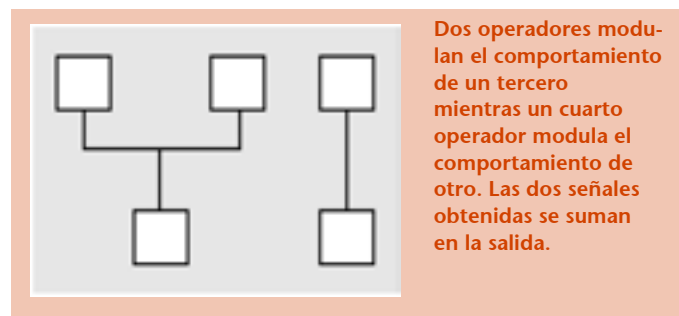
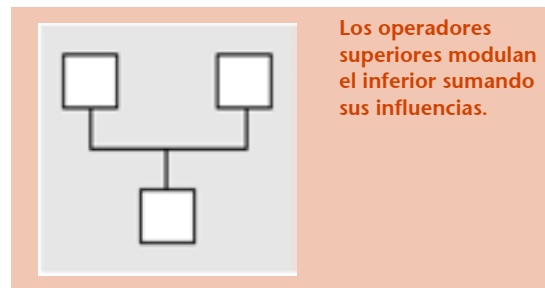
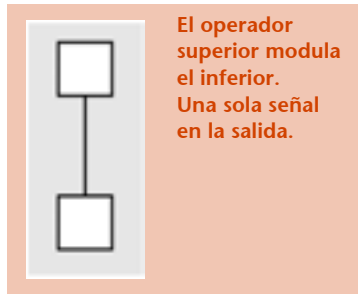
Para que la composición y la intensidad de parciales sea variable en el tiempo, como en los sonidos de la naturaleza, la síntesis de sonido por modulación de frecuencia hace variar el índice de modulación en el tiempo por medio del control de la envolvente de la señales modulantes. El índice de modulación varía en el tiempo siguiendo la forma de la envolvente de la señal modulante.

Operadores

En los dispositivos digitales *–hardware o software*, DX7 o SoundForge, por ejemplo– de generación de sonido por modulación de frecuencia, se acostumbra a denominar *operadores* a los osciladores generadores de señal. Del mismo modo, se adopta una simbología que indica las configuraciones de operadores, también denominadas, por abuso de lenguaje, *algoritmos*.



Dos operadores que se suman. Ninguno influye en el comportamiento del otro.



Memoria y control de resultados

La ventaja principal de la síntesis de sonido por modulación de frecuencia es el bajo coste de memoria, en relación con otros sistemas que utilizan tablas de almacenamiento de datos sonoros.

El mayor inconveniente reside en que es muy difícil controlar los resultados a partir de los parámetros mencionados. Un pequeño cambio en un parámetro puede alterar dramáticamente la salida del algoritmo.

Síntesis granular

Se trata de un interesante método de representación y síntesis de sonido. Parece que Isaak Beckman lo propuso por primera vez, aunque fue el físico británico Dennis Gabor, hacia 1946, quien estimulara el interés por dicho método de síntesis. Según él, cualquier sonido puede ser sintetizado por medio de la correcta combinación de un conjunto enorme de granos de sonido. El interés de esta técnica reside en el hecho de que el grano de sonido es portador de información propia del dominio de frecuencia, así como del dominio temporal. El actual desarrollo de las aplicaciones musicales que generan sonido con este medio se debe al trabajo pionero de Iannis Xenakis (1971) y Curtis Roads (1978). En 1986, Barry Truax la incluyó en el entorno interactivo de composición denominado PODX.

En la síntesis granular, se suman granos de sonido de duración –preferentemente entre decenas y centenares de milisegundos–, composición y forma dinámica variable. Dicha operación se acostumbra a llevar a cabo paralelamente en distintos dispositivos granuladores, de forma que se obtiene una trama de sonido de gran complejidad.

Si bien en un principio los granos fueron formas de onda senoidales con envolvente en forma de campana de Gauss, su composición puede extenderse a cualquier señal sonora. Por su parte, la envolvente también puede tomar otras formas, como por ejemplo la de un pulso o también la trapezoidal.

De la misma manera que la modulación de frecuencia, la síntesis granular puede ser implementada por medios analógicos. En realidad, las primeras obras de Iannis Xenakis consideradas como granulares son para grupo instrumental (*Analogique A*, 1958-59) y cinta magnética (*Analogique B*, 1958-59). Al respecto, también hay que tener en cuenta que los granos de sonido no necesariamente deben ser generados por la aplicación automática de un algoritmo determinado; pueden colocarse uno a uno, manualmente, en un dispositivo multipista, analógico o digital, y leerse posteriormente. Esto abre el camino al planteamiento de una nueva escritura musical.



Algunos parámetros importantes

A continuación tenemos algunos parámetros importantes de la síntesis granular de sonido:

- Velocidad de reproducción del grano
- Longitud inicial del grano. Distancia entre muestra inicial y final
- Duración del grano en reproducción
- Afinación relativa del grano
- Aleatoriedad de la altura de los granos sumados en la salida
- Cuantificación de las alturas de los granos

En los años 80 y 90 había pocas aplicaciones capaces de generar sonido por síntesis granular, y su uso se restringía a dispositivos especiales, como el citado PODX, el UPIC y otros algoritmos implementados en máquinas Unix; sin embargo, en el presente existen medios al alcance de los usuarios de ordenadores personales.

Una aplicación *freeware* para la generación de sonido por síntesis granular es Granulab. Está disponible en: <http://hem.passagen.se/rasmuse/Granny.htm>



Memoria, conceptualización y velocidad de proceso

La economía de memoria y la facilidad de conceptualización del sonido deseado en términos de grano son ventajas de la síntesis granular.

Su mayor inconveniente es la velocidad de proceso requerida, la cual aumenta con el número de granuladores que actúan en paralelo.

