

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

I.T. Telecomunicación (Sonido e Imagen)



**UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA**



**ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA**

“Diseño y tutorial de un sintetizador con la herramienta software Reaktor”

TRABAJO FINAL DE CARRERA

Autor/es:
Alberto Sola Salguero

Director/es:
**Jose Javier López Monfort
Antoni Josep Canós Marín**

GANDIA, 2010

Índice

1. Introducción

2. Fundamentos del Audio Digital

- Audio analógico y digital. Breve repaso histórico.
- Digitalización de las señales
- Procesado digital de audio: filtros, efectos, dinámica

3. MIDI

- Definición
- Historia
- Conexión Básica
- Configuraciones
- Soportes
- Codificación
- General MIDI

4. Síntesis de Sonido

- Introducción y definición
- Armónicos y formas de onda
- El Oscilador y la Envolvente
- Síntesis analógica vs Síntesis digital
- VSTs y SDK
- Tipos de síntesis

5. Tutorial de Síntesis con Reaktor

- Historia y situación actual
- Descripción básica de los elementos de Reaktor
- Diseño de un Instrumento básico
- Diseño de un Instrumento mediante dos tipos de síntesis:
 - Síntesis sustractiva
 - Síntesis FM

6. Conclusión

Bibliografía

- Apuntes Audio Digital
- 'Teoría y Técnica de la Música Electrónica' *Miller Puckette*
- www.duiops.net
- Hispasonic
- La Oreja Digital
- Abird
- www.vintagesynth.com
- Native Instruments website
- Manual de Reaktor
- [Wikipedia](https://es.wikipedia.org/)

1. INTRODUCCIÓN

La síntesis de sonido está íntimamente relacionada con la música. Los primeros sintetizadores fueron diseñados para emitir sonidos, pero acto seguido se dieron cuenta de que su aplicación en la música sería inmediata. Ya los mismos Theremin, enteramente electro-acústicos, eran usados para crear música. El punto de inflexión fue Walter Carlos con su *Switch-On Bach*. Había sido uno de los primeros clientes de Robert Moog, habiendo incluso participado en ensayos de su primer sintetizador, hasta que en el año 1968, Carlos publica *Switch-On Bach*, uno de los álbumes clásicos más vendidos de todos los tiempos, donde recrea la obra de Bach con sintetizadores. Más tarde Walter se convertiría en Wendy y elaboraría más obras maestras como la banda sonora de la *Naranja Mecánica*.

La evolución de los sintetizadores y sus distintos tipos de síntesis ha sido imparable. Desde las primeras síntesis sustractiva y aditiva (históricamente y generalizando la aditiva es más longeva por su aplicación en los órganos Hammond o en los Telharmonium), hasta las síntesis granular o la eficiente síntesis según el modelado físico. Estas dos últimas técnicas han sido posibles gracias al avance de la informática y del audio digital.

Y es con la llegada de los DSPs cuando la síntesis aditiva y FM toman el mercado a mediados de los 80 con síntesis masivos como el Yamaha DX7. El Compact Disc ve la luz de la mano de Phillips y Sony, cuando el sonido analógico del vinilo gobernaba en la industria del mercado musical. Se vendían cifras astronómicas y la gente veía normal pagar por la música (no había otro modo de conseguirla).

Más tarde, con el desarrollo de los microprocesadores, y el aumento de su velocidad, aparecieron la síntesis de tablas de ondas y los primeros samplers digitales, como los E-mu o Akai. Los sistemas de almacenamiento fueron mejorando hasta las actuales DAW (Digital Audio Workstation), popularizadas por Korg. Los 80 se acaban dejando a su paso una década de creación musical difícilmente superable, con la comunión de instrumentos acústicos y electrónicos y una serie de grupos que marcaron una época por su creatividad.

En los 90 llega la revolución informática a los sintetizadores. En 1996 surgen los VST. Con esta interfaz podemos disponer de versiones soft de los grandes síntesis clásicos. Por tanto supone un ahorro económico y en espacio. Al año siguiente, Native Instruments desarrolla Reaktor, basándose en los programas Max/msp y Pure Data. Ya podemos crear desde casa, con un simple ordenador, nuestras propias armas de creación musical.

Desde mediados de los 80 hasta mediados de los 90, fue también un largo período de asentamiento del audio digital, con la aceptación del CD, la aparición del CD-R y CD-RW, el demoleador mp3, y el desarrollo de Internet. Por todo esto las ventas en la industria musical bajaron y el vinilo perdió mucho protagonismo. Hoy en día es el propio CD quien no atraviesa a día de hoy un buen momento. El *streaming* y las descargas digitales son los protagonistas.

La filosofía DIY (Do it Yourself) cobra más fuerza incluso que en la época *punk* que la bautizó, por el desarrollo de portales con los que puedes promover tu propia música, realizada en home-studios de dudosa calidad, pero que muestras ideas frescas y novedosas. Tu mismo puedes construir tus sintetizadores, dar forma a la canción en un secuenciador y distribuirlo gratuitamente.

Pues bien, vamos a ver como hemos llegado a esto, y por qué no, vamos a crear nuestro primer sintetizador virtual.

2. FUNDAMENTOS DEL AUDIO DIGITAL

- **Audio Analógico y Digital. Breve repaso histórico.**

Repartíendose el trabajo, Sony la codificación digital y Philips el sistema óptico, los dos gigantes desarrollaron en 1982 un soporte de 12 cm, el cual puede contener hasta 80 minutos de música. Esto supuso más de lo almacenable en las dos caras del vinilo, y al ser de lectura óptica mediante láser, el disco no se deteriora con el número de reproducciones, cosa que sí ocurre con el vinilo, y es además mucho más resistente a la suciedad y a las ralladuras.

En el audio analógico, la información aparece como una variación continua de un parámetro como puede ser el voltaje en un cable o el flujo magnético de una antigua cinta de cassette. La señal analógica se puede alterar en el proceso de transmisión o grabación, por factores como sobre todo el ruido, la distorsión lineal, la distorsión armónica y la atenuación. Cuantas más etapas atraviesa una señal analógica, más se degrada.

Comparando ambos formatos, se demostró la superioridad del CD, tanto por su fidelidad como por la robustez y la ausencia de degradación del sonido con el tiempo. El CD destacó por su amplia dinámica que llegaba a los 90 db en todo el espectro de frecuencias audibles. El vinilo se queda en 70 db. En cuanto a la relación señal/ruido, los 90 db del CD también superan los 60 db del vinilo. La distorsión armónica del vinilo está entre el 1 y el 2%, nada que ver con el 0.01% del CD.

A estas ventajas técnicas, se le añadió la incorporación de una pequeña pista con la información de los tiempos y títulos, con las señales de inicio y final de cada zona grabada; una tabla de contenido que indica las selecciones con su duración y número; un código de control, que permite saber si la grabación es estereofónica o cuadrafónica; una marca de principio de música, o espacio en silencio entre piezas que es utilizado para contarlas; un número de pista e índice y un código de tiempo que controla la duración de cada canción y de todas ellas.

Por tanto el formato del vinilo ha quedado exclusivamente para coleccionistas, 'freakies' y románticos, quienes con sistemas de alta fidelidad minimizan la distorsión y relación señal/ruido. Este romanticismo, se debe en parte al eterno concepto de poder 'tocar' la música, a la calidez de los sistemas analógicos (en su mejor caso cuando atraviesa un sistema de válvulas) que trasmite el vinilo. Tanto es así, que las ventas del vinilo durante 2008 se doblaron con respecto al año anterior, y el CD bajó sus ventas un 35%, caída que viene sufriendo durante los últimos años.

Desde la perspectiva artística de la creación de música, el paso de lo analógico a la digital, fue también en los 80 con la aparición de los primeros sintetizadores digitales, además de los samplers. Quedó atrás la Música de los sintetizadores analógicos de Wendy Carlos y Robert Moog, que fue considerada durante mucho tiempo como experimental (a excepción de detalles de Theremin utilizados por los Beach Boys). Durante los 70, Kraftwerk se adelantaron a su tiempo y crearon la fusión entre pop minimalista y música electrónica, aún con sintes analógicos. Más tarde se denominaría *electro*. Por su parte, Jean-Michel Jarre experimentaba con 'Oxygene' creando un referente de la música electrónica de la era analógica.

Pero fue con la llegada de los sintes y samplers digitales, cuando se dio el salto a la verdadera cultura pop, cuando gente como Mike Oldfield, David Gilmour, Annie Lennox, Brian Eno o Jean-Michel Jarre, entre muchísimos más, comenzaron a usar el Fairlight (uno de los primeros samplers digital) en sus actuaciones. En 1983 se adopta el interface MIDI, multiplicándose las adopciones de los sintes digitales por parte de los grandes artistas, siendo los más populares el Yamaha DX7 y el Roland D50.

Hoy en día, empresas como Native Instruments, Arturia, Spectrasonics, IK Multimedia y D16, entre muchas otras, se dedican a hacer emulaciones software de los clásicos sintes analógicos y digitales, así como otras nuevas herramientas que facilitan la creación musical.

- **Digitalización de las señales**

Se trata de convertir la señal analógica en digital, con el propósito de facilitar su procesamiento (codificación, compresión, etc.) y hacer la señal resultante (digital) más inmune al ruido y otras interferencias a las que son más sensibles las señales analógicas.

- **Muestreo**

Primera parte de la digitalización de las señales. Consiste en tomar muestras periódicas de la amplitud de una señal analógica, siendo el intervalo entre las muestras constante. El ritmo de este muestreo se denomina frecuencia o tasa de muestreo y determina el número de muestras que se toman en un intervalo de tiempo.

El Muestreo está basado en el Teorema de Muestras, el cual afirma que toda señal de banda limitada puede expresarse de modo único en función de sus muestras o valores puntuales tomados a intervalos regulares T_s . Con el teorema de Nyquist-Shannon se demuestra que la reconstrucción exacta de una señal periódica continua en banda base a partir de sus muestras es matemáticamente posible si la señal está limitada en banda y la tasa de muestreo es superior al doble de su ancho de banda.

- **Cuantificación**

Se mide el nivel de voltaje de cada una de las muestras obtenidas en el primer proceso. Se establece un conjunto discreto de valores que la señal puede tomar en cada instante de muestreo. Se aproxima el valor de la señal a cuantificar al valor más cercano de este conjunto. Debido a esta aproximación existe un error de cuantificación. Este error se puede disminuir aumentando el número de niveles de cuantificación. En este momento, la señal analógica se convierte en señal digital, ya que los valores que están preestablecidos, son finitos. No obstante, todavía no se traduce al sistema binario. La señal ha quedado representada por un valor finito que durante la codificación (siguiente proceso) será cuando se transforme en una sucesión de ceros y unos. Conforme ha ido mejorando la tecnología de conversores A/D se han ido aumentando el número de niveles de cuantificación. Así, en la actualidad los sistemas de audio profesional utilizan 24 bits que corresponden a 16 millones de niveles de cuantificación.

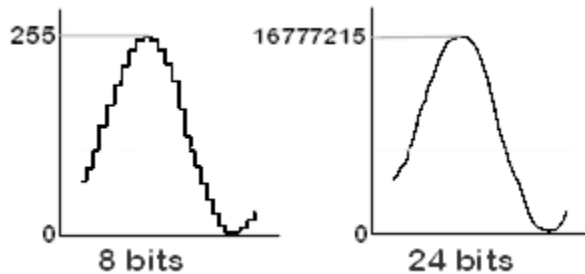
- **Codificación**

Consiste en la traducción de los valores de tensión eléctrica analógicos que ya han sido cuantificados al sistema binario, mediante códigos preestablecidos (códec). La señal analógica va a quedar transformada en un tren de impulsos digital (sucesión de unos y ceros). El códec viene definido por los siguientes parámetros: Número de canales, frecuencia de muestreo, resolución (nº de bits), bit rate o tasa de transferencia de datos y pérdida de información (compresión con pérdidas). La codificación más inmediata es la PCM. En cuanto a la resolución, se trata de utilizar un número de niveles de cuantificación que sea potencia de 2, y codificar en binario dicho nivel. $N = 2^n$. Siendo n el número de bits. Estos valores serán transmitidos secuencialmente por el canal de modo que el régimen binario necesario o bit rate será de: $R = n \cdot f_s$ [bits / seg]

Parámetros de la digitalización

La resolución es la cantidad de bits que se usan para obtener cada número binario que corresponde a cada punto de la curva analógica. Con 8 bits podemos representar valores o niveles de 0 a 255. Con esto se obtiene una onda digital poco precisa y ruidosa, para nada fiel al sonido original.

Con 24 bits, la resolución más usada en sonido profesional, podemos representar la onda con valores comprendidos entre 0 y 16.777.215, con lo cual se obtiene una onda de sonido extremadamente precisa. También suele usarse la resolución de 32 bits.



Resolución en bits del Sonido Digital

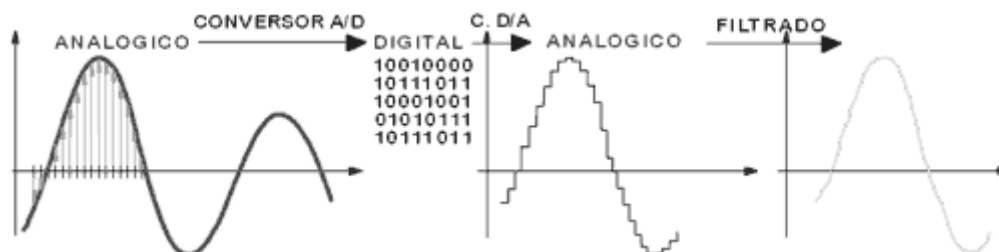
La velocidad de muestreo (Sample Rate) es otro parámetro que determina la calidad del audio digital y mide la cantidad de muestras (medición del nivel) que se toman por segundo. A mayor velocidad de muestreo mayor es la calidad de audio debido a que transcurre menos tiempo entre una medición y otra permitiéndonos mayor precisión. Se mide en Kbits/seg

El **rango dinámico** o **margen dinámico** se puede definir de dos maneras:

- El margen que hay entre el nivel de referencia y el ruido de fondo de un determinado sistema, medido en decibelios. En este caso rango dinámico y relación señal/ruido son términos intercambiables.
- El margen que hay desde el nivel de pico y el nivel de ruido de fondo. También indicado en dB. En este caso, rango dinámico y relación señal/ruido no son equiparables.

Los Compact Disc tienen un rango dinámico muy superior al de los cassettes.
CD: 90dB; Cassette: 50dB.

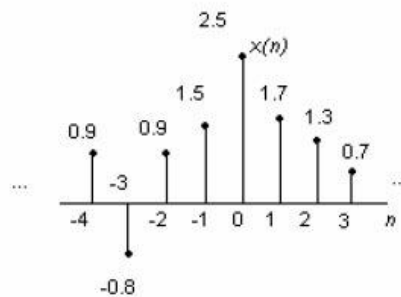
Finalmente, esta señal de salida es filtrada para suavizar los cambios bruscos de niveles y acercarse más a la forma de onda original, quedando terminado el proceso de digitalización.



- **Procesado digital de audio: filtros, efectos y dinámica**

Este procesamiento analiza y procesa las señales de audio que son discretas. Se puede procesar una señal para obtener una disminución del nivel de ruido, para mejorar la presencia de determinados matices, como los graves o los agudos. Se realiza combinando los valores de la señal para generar otros nuevos.

Las señales pueden ser discretas en el tiempo o continuas. Si hablo, mi voz es una señal continua en el tiempo, es infinita en un intervalo muy pequeño de tiempo. Si discretizamos la voz tendremos un número finito de muestras en un intervalo de tiempo. Una señal en tiempo discreto $x[n]$ es una función de una variable independiente entera. Gráficamente:



Uno de los beneficios principales del proceso digital de audio es que las transformaciones de señales son más sencillas de realizar. Una de las más importantes transformadas es la Transformada de Fourier Discreta. Esta transformada convierte la señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. Esta TDF permite un análisis más sencillo y eficaz sobre la frecuencia, sobre todo en aplicaciones de eliminación de ruido y en otros tipos de filtrado (pasa bajos, filtros pasa altos, filtros pasa banda, filtros de rechazo de banda, etc.).

Un filtro digital es un sistema que, dependiendo de las variaciones de las señales de entrada en el tiempo y amplitud, se realiza un procesamiento matemático sobre dicha señal, generalmente mediante el uso de la Transformada de Fourier.

Los operadores básicos en el procesamiento digital de audio son:

- Retardo de una muestra $\rightarrow y[n] = x[n-1]$
- Multiplicador de ganancia $g \rightarrow y[n] = g \cdot x[n]$
- Sumador $\rightarrow y[n] = x_1[n] + x_2[n]$

- Filtros recursivos y no recursivos

Un filtro no-recursivo es aquel cuya salida está calculada exclusivamente a partir de valores de entrada ($y_n = x_n + x_{n-1} + x_{n-2} \dots$), mientras que uno recursivo es aquel que además de los valores de entrada, emplea valores previos de salida ($y_{n-1}, y_{n-2} \dots$) los cuales se almacenan en la memoria del procesador. La palabra recursivo significa literalmente 'volver hacia atrás' y se refiere al hecho de que los valores de salida previamente calculados vuelven de nuevo para calcular los nuevos valores de salida.

Explicándolo así, puede parecer que los filtros recursivos requieren más cálculos para ser ejecutados. Pero la realidad es que un filtro recursivo generalmente requiere mucho menos coeficientes para que evalúe el procesador, es decir, que es de menor orden y es más corto, que un filtro no-recursivo que persiga una frecuencia dada.

Hay quien prefiere una terminología alternativa, por lo que los filtros no-recursivos se conocen como filtro FIR (Respuesta al Impulso Finita) y los recursivos como filtros IIR (Respuesta al Impulso Infinita).

Estos términos se refieren a las diferentes respuestas al impulso de ambos tipos de filtros. La respuesta al impulso de un filtro digital es la secuencia de salida cuando se aplica un impulso unidad (delta) a su entrada.

Un filtro FIR es uno cuya respuesta es de una duración finita. Uno IIR es aquel cuya respuesta al impulso teóricamente es infinita debido a la recursividad, con valores previos de salida que constantemente están siendo devueltos a la entrada. Pero realmente el término IIR no es muy afortunado dado que casi todos los filtros IIR reducen virtualmente su salida a cero a un tiempo dado, de hecho, antes que los FIR.

- Transformada Z

Convierte una señal que esté definida en el dominio del tiempo discreto (secuencia de números reales) en una representación en el dominio de la frecuencia compleja. Se puede ver como una extensión de la transformada de Laplace a los sistemas digitales. Permite analizar si un filtro IIR va a ser estable o no antes de implementarlo a partir de sus coeficientes a, b. Además, permite analizar la respuesta en frecuencia de los filtros FIR e IIR.

Dada una señal $x[n]$ se define su transformada Z como:

$$X(z) = Z\{x[n]\} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n] \cdot z^{-n}$$

Propiedades:

- Linealidad: La TZ de una combinación lineal de dos señales en el tiempo es la combinación lineal de sus transformadas en Z.

$$Z(a_1x_1[n] + a_2x_2[n]) = a_1Z(x_1[n]) + a_2Z(x_2[n])$$

- Desplazamiento temporal: Un desplazamiento de k hacia la derecha en el dominio del tiempo es una multiplicación por z^{-k} en el dominio de Z.

$$Z(x[n-k]) = z^{-k}Z(x[n])$$

- Convolución: La TZ de la convolución de dos señales en el tiempo es el producto de ambas en el dominio Z.

$$Z(\{x[n]\} * \{y[n]\}) = Z(\{x[n]\})Z(\{y[n]\})$$

- Diferenciación:

$$Z(\{n x[n]\}) = -z \frac{dZ(\{x[n]\})}{dz}$$

- Filtro digital FIR (Finite Impulse Response)

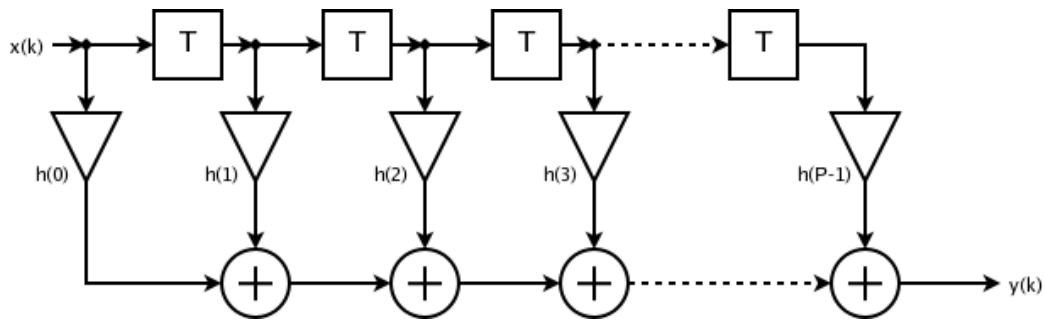
Es un tipo de filtro digital que si su entrada es un impulso (delta), la salida será un número limitado de términos no nulos. Para obtener la salida sólo se emplean valores de la entrada actual y anteriores. También se llaman filtros no-recursivos. Su expresión en el dominio discreto es:

$$y_n = \sum_{k=0}^{N-1} b_k x(n-k)$$

El orden del filtro está dado por N, es decir, el número de coeficientes. También la salida puede ser expresada como la convolución de una señal de entrada x[n] con un filtro h[h]:

$$y_n = \sum_{k=0}^{N-1} h_k x_{n-k}$$

La estructura de un filtro FIR por tanto es la siguiente:



La cual puede verse reflejada en la aplicación de la transformada Z:

$$H(z) = \sum_{k=0}^{N-1} h_k z^{-k} = h_0 + h_1 z^{-1} + \dots + h_{N-1} z^{-(N-1)}$$

Se puede ver que es la misma entrada retardada cada vez más en el tiempo, multiplicada por diversos coeficientes y finalmente sumada al final. Hay muchas variaciones de esta estructura. Si tenemos una respuesta de frecuencia como objetivo, conseguiremos que la respuesta del filtro se asemeje más a ella cuanto más largo sea o número de coeficientes tenga.

Los filtros FIR son estables puesto que sólo tienen polos, es decir, elementos en el numerador en su función de transferencia. También tienen la ventaja que pueden diseñarse para ser de fase lineal, es decir, no introducen desfases en la señal, a diferencia de los IIR o los filtros analógicos. Por ese motivo tienen interés en audio.

Sin embargo, tienen el inconveniente de ser más largos al tener más coeficientes que los filtros IIR capaces de cumplir similares características. Esto requiere un mayor tiempo de cálculo que puede dar problemas en aplicaciones en tiempo real, como estudios de grabación o conciertos en directo.

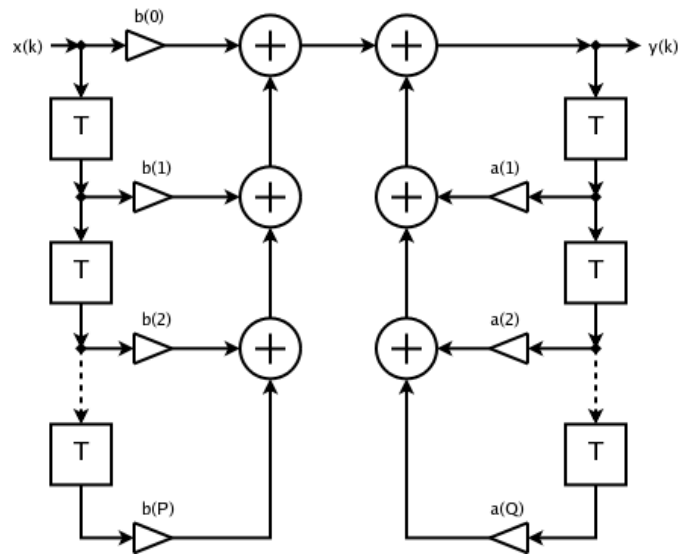
El diseño de los filtros FIR se hace generalmente mediante el método del enventanado. Tomando una plantilla en el dominio de la frecuencia con las características que se desean para el filtro, haciendo la Transformada de Fourier Inversa y truncando la secuencia resultante con un enventanado de dicha secuencia. Las ventanas más utilizadas son vonHann, Hamming y Kaiser.

- Filtro IIR (Infinite Impulse Response)

Es un tipo de filtro digital que si su entrada es un impulso (delta), la salida será un número ilimitado de término no nulos, es decir, que nunca volverá a un estado de reposo. Para obtener la salida se emplean valores de la entrada actual y anteriores, y además, valores de salida anteriores que son almacenados en memoria y realimentados a la entrada. También se llaman filtros digitales recursivos. Su expresión en el dominio discreto es:

$$y[n] = \sum_{i=0}^P b_i x[n-i] - \sum_{j=0}^Q a_j y[n-j]$$

El orden del filtro está dado por el máximo entre P y Q. Una de las posibles estructuras para un filtro IIR es la siguiente:



Se puede ver cómo la salida $y[k]$ es introducida de nuevo en el sistema. La transformada Z del mismo es:

$$H(z) = \frac{\sum_{i=0}^P b_i z^{-i}}{\sum_{j=0}^Q a_j z^{-j}}$$

Vemos que ahora tenemos un denominador, es decir, ceros además de polos, que son los causantes de las posibles inestabilidades que pueden comprometer la estabilidad y causalidad del sistema.

Las ventajas de los filtros IIR respecto a los FIR es que puede conseguir una misma respuesta empleando un número de coeficientes en el filtro mucho menor, requiriendo un menor tiempo de cálculo. El inconveniente es, además de la inestabilidad, la introducción de desfases en la señal, que pueden ser compensados pero a costa de añadir más coeficientes al filtro.

Estabilidad de un filtro IIR

Está relacionada con la posición de los polos respecto al círculo unidad en el plano complejo. Los polinomios del numerador y denominador de la ecuación en diferencias se pueden expresar en función de sus raíces. Se puede demostrar que para un sistema estable todos los polos están estrictamente dentro del círculo unidad $|p_i| < 1$. De forma opuesta, si existe al menos un polo fuera del círculo unidad, el sistema es inestable, $|p_i| > 1$.

Diseño y tipos de filtros IIR

Las formas habituales de diseñar este tipo de filtros son indirecta o directamente. En la forma indirecta se trata de diseñar a partir de prototipos analógicos, y en la forma directa, mediante aproximación de mínimos cuadrados. Dentro de los basados en prototipos analógicos, encontramos:

- Filtro de Butterworth: Respuesta plana en la banda de paso y banda de transición relativamente ancha.
- Filtro de Chebyshev (tipo I): Rizado en la banda de paso y sin rizado en la banda atenuada. Banda de transición menor que con Butterworth.
- Filtro de Chebyshev (tipo II): Rizado en la banda atenuada y banda de paso plana. Banda de transición menor que con Butterworth.
- Filtros Elípticos: Rizado tanto en la banda de paso como en la atenuada. La banda de transición es la menor de todos.

Otros filtros IIR

Son filtros de 2º orden muy utilizados para aplicaciones de audio.

- Filtro de Shelving: Clásicos controles de tono de los amplificadores. Realzan la zona de graves o la de agudos.
- Filtro Peak: Son los utilizados en los ecualizadores paramétricos. Realzan una banda muy estrecha.
- Filtro de endidura (notch): Se utilizan para atenuar una frecuencia. Son muy estrechos.
- Filtro paso todo: El módulo de la respuesta en frecuencia es 1. Sólo alteran la fase.

- Transformada de Fourier

Para señales discretas (digitales) podemos distinguir tres transformadas:

- Transformadas de Fourier de señales discretas (DTFT): Es continua.
- Transformada de Fourier discreta (DFT): Es discreta (muestreo de la DTFT)
- Transformada Rápida de Fourier (FFT): Es la misma que la DFT pero calculada con un algoritmo especial, con muchas menos operaciones.

En la práctica no es cómodo trabajar con los ordenadores con un espectro continuo $X(\omega)$. Así, pasamos de tiempo continuo a valores de tiempo discreto $x(t) \rightarrow x[n]$ y calculamos la DFT:

$$X(\Omega) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n] e^{-j\Omega n} \quad \text{donde } \Omega = 2\pi / N \quad \text{y } N \text{ representa el período de la señal}$$

Esta DFT requiere un orden de operaciones proporcional al tamaño N de la señal. Esto puede llegar a ser muy elevado y requerir unos tiempos de cálculo muy altos. Cuando N es potencia de 2, la FFT permite realizar estos cálculos en mucho menos tiempo. Devuelve valores entre $[0, 2\pi]$.

La evaluación directa de esa fórmula requiere $O(n^2)$ operaciones aritméticas. Mediante un algoritmo FFT se puede obtener el mismo resultado con sólo $O(n \log n)$ operaciones. En general, dichos algoritmos dependen de la factorización de n pero, al contrario de lo que frecuentemente se cree, existen FFTs para cualquier n , incluso con n primo.

La idea que permite esta optimización es la descomposición de la transformada a tratar en otras más simples y éstas a su vez hasta llegar a transformadas de 2 elementos donde k puede tomar los valores 0 y 1. Una vez resueltas las transformadas más simples hay que agruparlas en otras de nivel superior que deben resolverse de nuevo y así sucesivamente hasta llegar al nivel más alto. Al final de este proceso, los resultados obtenidos deben reordenarse.

Dado que la transformada discreta de Fourier inversa es análoga a la transformada discreta de Fourier, con distinto signo en el exponente y un factor $1/n$, cualquier algoritmo FFT puede ser fácilmente adaptado para el cálculo de la transformada inversa.

Aplicaciones:

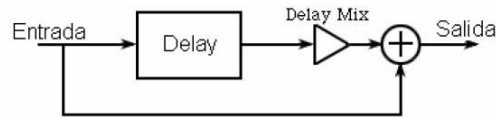
- Tratamiento de imagen (jpeg) y audio (mp3).
- Reducción de ruido en señales, como el ruido blanco.
- Análisis en frecuencia de cualquier señal discreta.
- Análisis de materiales y estadística.
- Síntesis, mediante la transformada inversa IFFT.

- Efectos digitales

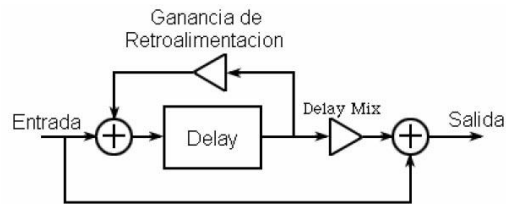
1. Retardo (Delay)

Es uno de los efectos más simples que existen, pero es muy valioso al utilizarlo apropiadamente. Un retraso pequeño puede darle vida a una mezcla simple, dando cuerpo al sonido del instrumento. El retraso es un bloque básico para el diseño de otros efectos, tal como la reverberación, choros y flanger.

El funcionamiento es sencillo, simplemente se emite la señal de entrada después de un tiempo de retraso. Este tiempo puede variar desde milisegundos hasta segundos. En la figura representa el diagrama de un retraso básico. Este sólo produce una copia simple de la entrada, por eso se obtiene un solo tipo de eco. Siendo el módulo Delay = Z^{-N} y siendo N el retardo variable.



El tener un eco simple llega a ser limitante, por lo que a muchos delays se les agrega un control de retroalimentación, con el cual se lleva la salida del delay hacia la entrada, como se muestra en la siguiente figura. Con esto se puede repetir el sonido una y otra vez, y se disminuye el volumen gradualmente.



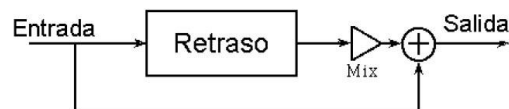
El retraso es muy útil para complementar el sonido de un instrumento al pasar por una unidad de delay con valores de 50 a 100 milisegundos, creando un efecto doble, como si se tocaran dos instrumentos al mismo tiempo.

2. Chorus

El efecto Chorus puede hacer que un solo instrumento suene como si se estuvieran tocando muchos instrumentos a la vez. Le agrega cuerpo al sonido, llegando a percibirse como un sonido más “rico”.

Para crear el efecto de dos o más instrumentos al unísono se debe generar un pequeño retardo y un ligero desvío o cambio en el sonido sin llegar a desafinar. El pequeño retraso puede implementarse con una línea de efecto delay o una línea de retraso de longitud variable. Al tener longitud variable, se puede modificar el tiempo de retraso, además de que se logra un ligero efecto en el pitch o tono. Cuando se aumenta la longitud, varía el pitch resultando un sonido más grave, y cuando se disminuye, resulta más agudo.

Entonces, al mezclar la salida de la copia con retraso y pitch modulado con la señal original, se obtiene el efecto de coros, tal y como se muestra en la figura:



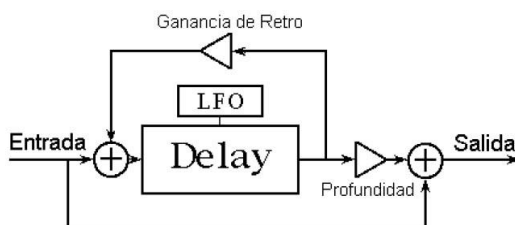
La estructura de este efecto es muy parecida a la del Flanger, sólo que el Chorus difiere en que los retrasos son más largos, normalmente entre 20 y 30 ms. Al tener un retraso más largo no produce los sonidos característicos de un flanger.

Para la implementación digital, los retrasos se implementan como buffers circulares. Sin embargo, el retraso variable es más complejo, pues requiere de tiempos de retraso que no sean múltiplos enteros del período de muestreo. Por lo que es común estimar el valor de la señal entre dos valores que ya tenemos guardados. Con esos valores, se realiza una interpolación para tomar un valor diferente. Este método es implementado al conectar los dos valores con una línea recta, y entonces ver el valor de esa línea sobre cierto punto que corresponda al tiempo de retraso deseado.

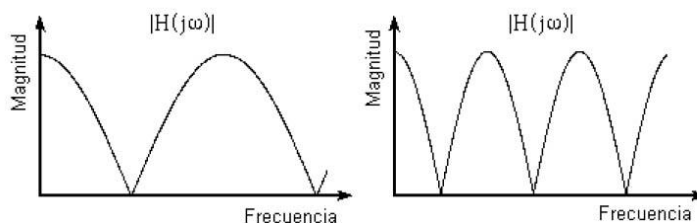
En el Chorus de 2 instrumentos, el retardo vendrá modulado por un LFO (Oscilador de Baja Frecuencia), que tiene menos profundidad de modulación que el Flanger. Para implementar el de 3 instrumentos, necesitaremos distintos retardos, con distintos LFOs.

3. Flanger

Tiene un sonido muy característico, como el efecto producido por un jet en pleno vuelo. El flanger es considerado como un tipo particular de phasing, pero crea un grupo de notches espaciados equitativamente en el espectro en frecuencia. Es creado por la mezcla de una señal con una copia ligeramente retardada de ella misma, donde la longitud del retraso cambia constantemente. No es difícil producirlo con un equipo de audio estándar, y se cree que el flanging fue descubierto de modo accidental. Los flangers actuales permiten darle forma al sonido mediante el control del retraso de la señal que es sumada a la original, normalmente se le conoce como control de profundidad o mezcla.



Cuando se escucha la señal del flanger, no se percibe un eco como tal porque el retraso es muy corto. Los tiempos de retraso típicos son de 1 a 10 milisegundos. En vez de crearse un eco, el retraso tiene un efecto de filtrado en la señal, y este efecto crea una serie de notches en la respuesta en frecuencia, tal y como muestra la figura:



Los puntos en donde la respuesta en frecuencia llega a cero indican que los sonidos de esa frecuencia son eliminados, mientras que las demás frecuencias pasan con un ligero cambio en su amplitud. Estas respuestas en frecuencia son llamadas filtro peine.

El sonido característico de un flanger resulta cuando estos notches recorren hacia arriba y hacia abajo el eje de frecuencia en el tiempo. La acción de barrido de los notches es lograda por el cambio continuo de la cantidad de retardo utilizada. Conforme el retardo se incrementa, los notches se deslizan hacia abajo en las bajas frecuencias. El modo en el cual el retardo cambia es determinado por la onda del LFO (Oscilador de Baja Frecuencia).

Este cambio del retraso en el flanger crea una modulación de pitch. Esto sucede porque se tiene que leer más rápido o leer más lento desde la señal retrasada. Sólo la copia retrasada del sonido tiene este cambio en el pitch, que es mezclado posteriormente con la señal sin alteración.

Para la implementación digital, se debe tomar en cuenta que en el mundo digital, los delays son implementados utilizando líneas de retraso o buffers circulares (un bloque de memoria es utilizado para guardar un número de valores, y se leen y escriben continuamente en ese espacio). Pero la implementación de un cambio continuo de tiempo de retraso lo hace interesante. Debido a que las muestras son siempre tomadas un periodo de muestra después, no se puede crear una línea de retraso cuyo retardo no es un múltiplo integral del periodo de muestreo.

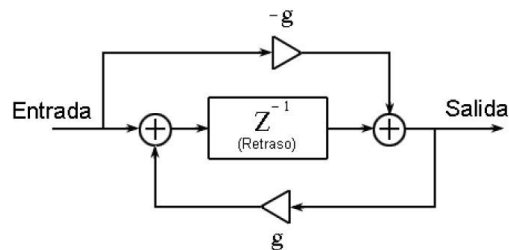
4. Phaser

Efecto de sonido similar al flanger. La diferencia reside en que el phaser aplica variaciones de fase a los retardos sumados a la señal de entrada. Los notches necesarios para realizar el cambio de fase son implementados utilizando un grupo especial de filtros llamado filtros Pasa-Todo. Como su nombre indica, permite pasar a todas las frecuencias de entrada sin atenuación ni amplificación. Para completar el phaser, se agrega un sumador para la salida del filtro y la señal de entrada:



La cantidad de señal filtrada que aparece en la salida es determinada por el control de profundidad.

Para implementar un phaser digital se debe crear un filtro Pasa-Todo. La siguiente figura muestra su diagrama de flujo, donde las ganancias de los lazos de retroalimentación y pro-alimentación son negativas una con respecto de la otra:



Los filtros Pasa-Todo digitales también son muy útiles en muchas técnicas de síntesis de sonido. Teniendo en cuenta que estos filtros retrasan la señal para la mayoría de las frecuencias, el retraso será una fracción del periodo de muestreo. Cuando se intenta modelar físicamente un instrumento musical, se puede utilizar este retraso fraccional para crear una estructura resonante con un periodo que no es múltiplo del periodo de muestreo. Esta técnica es una alternativa a la interpolación. El problema principal es que debido a que no todas las frecuencias son retrasadas de la misma manera, los armónicos pueden desafinar durante la síntesis.

5. Modulación en Anillo

Es un dispositivo simple que puede ser utilizado para crear sonidos inusuales provenientes de la salida de un instrumento. Se trata de hacer la multiplicación de dos señales de entrada. A su salida, el modulador en anillo entregará una señal que será el producto de la suma y diferencia de todos los componentes de frecuencia de ambas señales.

Típicamente, este tipo de procesado consigue buenos sonidos de marcado carácter metálico. Usualmente, una de estas frecuencias está en un rango por debajo de lo audible, dando lugar a la creación de un sonido constituido por dos frecuencias similares, cuya textura tiene usualmente características de tipo ruido.

6. Reverberación Digital

Probablemente sea el procesador de efectos más habitual en cualquier tipo de producción independientemente del estilo musical en el que nos movamos. A priori, el uso o la utilización de las reverbs es la simulación de un recinto acústico concreto modelando este recinto mediante una serie de parámetros. Pero en muchos casos es más bien una herramienta de creación y modelado de nuevos sonidos que nos permite enriquecer o personalizar un sonido o una pista completa.

El objetivo es simular la acústica de una sala a partir de una señal limpia de un instrumento, voz o música. Una señal limpia es la que se toma en un estudio acondicionado acústicamente y que está exenta de reverberación. Podemos simular que el instrumento suena en una sala con las características que deseemos.

Las implementaciones en el mundo digital pueden dividirse en eficientes buffers circulares y operaciones en líneas de delay. Los primeros algoritmos digitales de reverberación intentaron imitar la reverberación de los salas utilizando primordialmente dos tipos de filtros con respuestas al impulso infinitas (IIR) de manera que la salida decayera gradualmente. Uno de estos filtros es el Filtro Peine, el cual obtiene su nombre de los notches en la respuesta en frecuencia.

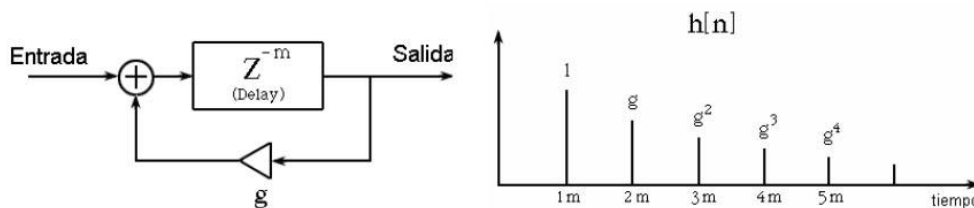


Diagrama y respuesta en frecuencia de un filtro peine

La respuesta al impulso de un filtro peine se parece a un impulso rebotando entre dos paredes, haciéndose cada vez más débil con cada reflejo. El tiempo de retraso utilizado puede ser comparado al tiempo que le toma al impulso para reflejarse desde una pared y llegar a la escucha. La ganancia utilizada en un filtro puede ser escogida para alcanzar un tiempo de reverberación deseado.

El otro filtro primordial es el filtro Pasa-Todo, que tiene la propiedad de dejar pasar a todas las frecuencias sin afectarlas, reduciendo una coloración del sonido.

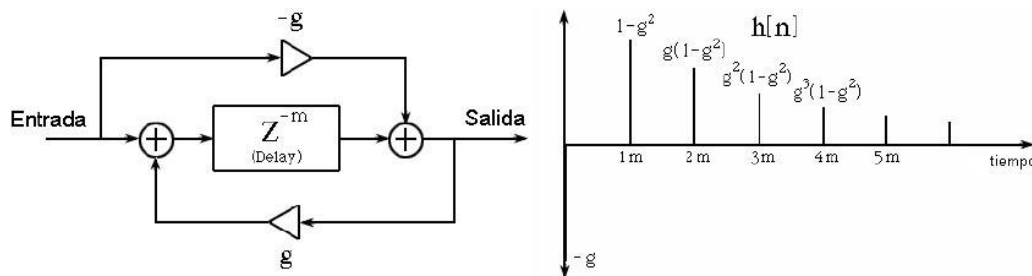


Diagrama y respuesta en frecuencia del Filtro Pasa-Todo

La estructura de este filtro es muy similar a la del filtro peine, pero contiene una ruta de alimentación adicional. El retraso puede ser cualquier número positivo de muestras y aún mostrará una respuesta plana en frecuencia. En las aplicaciones de reverberación, el retraso utilizado es de milisegundos, para mantener a los reflejos espaciados de una manera similar a la respuesta al impulso de un recinto.

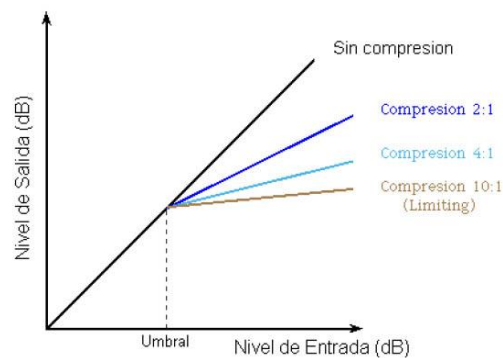
- Control digital de la dinámica

El objetivo de los algoritmos de procesamiento de dinámica es cambiar el rango dinámico de una señal, es decir, cambiar la distancia entre el volumen que hay entre el sonido más débil de la señal y el más fuerte

1. Compresión

Como su nombre indica, la compresión reduce el rango dinámico de una señal. Es utilizado extensamente en la grabación de audio, trabajo de producción y reducción de ruido, pero debe ser utilizado con cuidado pues tiende a silenciar los sonidos altos y aumentar los sonidos silenciosos.

La relación de entrada/salida se describe con una gráfica simple, como en la figura:



El eje horizontal corresponde al nivel de la señal de entrada, y el vertical al nivel de salida. Una línea de 45° indica que hay ganancia unitaria, por tanto no hay compresión. El compresor cambia la inclinación de la línea sobre el valor de umbral, donde la altura de la línea define el rango dinámico de la salida, y la inclinación es la ganancia del compresor.

- Umbral: Nivel de volumen a partir del cual el compresor empieza a actuar.
- Relación de compresión: Cociente entre la variación de entrada y salida pasado el umbral.
- Tiempo de ataque: Tiempo que se tarda desde que la señal de entrada supera el umbral hasta que se empieza a actuar.
- Tiempo de relajación: Tiempo que se tarda desde que la señal baja por debajo del umbral hasta que se deja de actuar.
- Rótula (Knee): Regular la transición entre el estado procesado y sin procesar. Podemos hacer una transición brusca (hard) como la de la gráfica, o bien una transición blanda (soft), que representaremos por una curva y que permitirá una compresión más suave y gradual.
- Side-chain: Se utiliza una señal externa en el circuito de detección. De esta forma esta señal controla cuando se dispara la compresión, aunque lo que se comprime es la señal principal.

2. Limitación

Un limitador es un compresor con un ratio de compresión grande. Superior a 10:1. Podemos ver su representación en la línea marrón del gráfico anterior. Controles similares al compresor.

3. Puertas de ruido

Las puertas de ruido silencian la señal si la misma se encuentra por debajo del umbral. Se utilizan para eliminar los ruidos de fondo despreciables. La mayoría de las puertas también permiten la posibilidad de cerrarse parcialmente, introduciendo cierta atenuación en vez de cerrarse del todo. Los controles son similares al compresor.

4. Expansión

Se utilizan para incrementar (restaurar) el rango dinámico de señales procesadas con compresores. Hace el proceso inverso de un compresor y sus controles son similares a éste.

3. MIDI

- **Definición**

El acrónimo MIDI corresponde a Musical Instruments Digital Interface (Interface Digital para Instrumentos Musicales). Describe una norma de comunicación física entre sistemas (conectores, cables, protocolos de comunicación) y las características del lenguaje que hacen posible el intercambio de información entre los sistemas. Es importante tener presente que MIDI no transmite sonidos, sino información sobre como se ha de reproducir una determinada pieza musical. Sería el equivalente informático a la partitura.

Este protocolo de comunicación, permite el intercambio de información de control o generación musical, donde todas las acciones musicales que se realizan en un instrumento, son traducidas a lenguaje MIDI para que otros instrumentos las repitan de la misma forma. Así, como decíamos, el interfaz MIDI no maneja sonidos reales, sino que contiene instrucciones que señalan las acciones que debe tomar el dispositivo controlada por producir o procesar el sonido. Podemos decir, que la interconexión MIDI conlleva el control remoto de instrumentos musicales electrónicos que son MIDI. El protocolo incluye especificaciones complementarias de hardware y software.

Todas las actividades musicales o parámetros que definen el comportamiento de un dispositivo, han sido asignadas a palabras en lenguaje MIDI y son esas palabras las que entienden los instrumentos musicales electrónicos que son MIDI.

De la misma forma que un músico entiende su partitura, el lenguaje MIDI es entendido por pequeños microprocesadores que incorporan algunos instrumentos electrónicos y los cuales identifican las acciones musicales y las “traducen” a mensajes MIDI (o viceversa). Estos procesadores cumplen dos funciones principales:

- Identifican cualquier actividad musical que realice el músico sobre el instrumento o cualquier variación de los controles de un equipo de procesado de audio, para convertirla en un mensaje MIDI.
- Reciben la información que llega desde otro equipo o instrumento por medio de los conectores MIDI, para luego aplicarla al instrumento o equipo que representan.

Cuando los mensajes MIDI son enviados, todos los aparatos que sean capaces de reconocerlos e interpretarlos, responderán a esas órdenes de forma que funcionen sincronizadamente. Estos mensajes llevan:

- de un instrumento a otro (sintetizadores, módulos de sonido, etc.), todas las combinaciones posibles de acciones musicales y técnicas que pueda tener una obra (notas musicales, dinámicos, efectos de interpretación, etc.)
- de un equipo a otro (mesa de mezclas, multiefectos...), parámetros para el control de las diferentes funciones que implementan.

- **Historia**

El repentino inicio de los sintetizadores analógicos en la música popular de los años 70 llevó a los músicos a exigir más prestaciones de sus instrumentos. Interconectar sintetizadores analógicos es relativamente fácil ya que estos pueden controlarse a través de osciladores de voltaje variable.

La aparición del sintetizador digital a finales de la misma década trajo consigo el problema de la incompatibilidad de los sistemas que usaba cada fabricante. De este modo se hacía necesario crear un lenguaje común por encima de los parámetros que cada marca iba generando a lo largo del desarrollo de los distintos instrumentos electrónicos puestos a disposición de los profesionales del sector.

El estándar MIDI fue inicialmente propuesto en un documento dirigido a la Audio Engineering Society por Dave Smith, presidente de la compañía Sequential Circuits en 1981. La primera especificación MIDI se publicó en agosto de 1983.

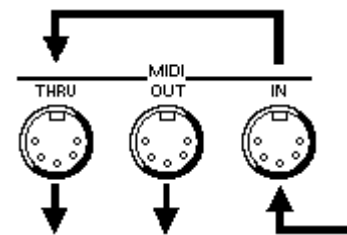
En la actualidad la gran mayoría de los creadores musicales utilizan lenguaje MIDI a fin de llevar a cabo la edición de partituras y la instrumentación previa a la grabación con instrumentos reales. Sin embargo, la perfección adquirida por los sintetizadores en la actualidad lleva a la utilización de forma directa en las grabaciones de los sonidos resultantes del envío de la partitura electrónica a dichos sintetizadores de última generación.

- **Conexión Básica**

El sistema MIDI tiene una forma de conexión muy sencilla. Debe haber un aparato que transmita la información (controlador o maestro), un cable que conecte (cable MIDI) y otro aparato que recibe la información (esclavo).

Existen tres tipos de conector o puerto MIDI:

- MIDI IN: Llega la información procedente de otros dispositivos.
- MIDI OUT: Sale información producida por el dispositivo, hacia otros equipos.
- MIDI THRU: Sale una réplica de la información que llega al puerto IN.



La comunicación entre los instrumentos MIDI se realiza en 3 pasos básicos:

1. El aparato maestro se encarga de generar los mensajes MIDI, los cuales salen por su conector MIDI out.
2. El cable MIDI se encarga de llevar la información MIDI de un aparato a otro.
 - Conector del tipo DIN de 5 pines. La transmisión de datos sólo usa el pin número 5. Los números 1 y 3 se reservaron para añadir funciones en un futuro. Los restantes (2 y 4) se utilizan como blindaje y para transmitir una tensión de +5 V, para asegurarse que la electricidad fluya en la dirección deseada. En la actualidad, los fabricantes de equipos económicos y por ello, muy populares, de empresas tales como Casio, Korg y Roland han sustituido los cables y conectores MIDI estándar por los de tipo USB que son más fáciles de hallar en un comercio y que permiten una fácil conexión a los ordenadores actuales.
3. El aparato esclavo recibe los mensajes MIDI por su conector MIDI IN.

No todos los instrumentos musicales electrónicos poseen los conectores MIDI, así como tampoco, no todos los aparatos MIDI poseen todos los conectores MIDI.

- **Configuraciones**

El formato más simple de conexión es el formado por un dispositivo maestro (por ejemplo, un controlador) y un esclavo (como un sintetizador). En este caso, el maestro dispondrá de un conector MIDI OUT, de donde saldrán los mensajes MIDI generados, el cual debemos unir al conector MIDI IN en el esclavo.

MIDI admite la conexión de un solo maestro a varios dispositivos esclavos en cascada. Para esos casos se utilizará MIDI THRU, uniendo el maestro con una de las unidades del modo descrito anteriormente. En el conector MIDI THRU de esa unidad se obtiene una copia de los mensajes MIDI que se introducen a través de MIDI IN, por lo que ese MIDI THRU se conectará con un MIDI IN de otra de las unidades. A esto se le llama Daisy Chain.

Supongamos que uno de los esclavos también incluye un controlador (como un sintetizador con teclado). Éste dispondrá de conector MIDI OUT. En ese caso, obtendremos los mensajes generados desde controlador MIDI OUT

- **Soportes**

Los aparatos MIDI se pueden clasificar en tres grandes categorías:

1. **Controladores:** Generan los mensajes MIDI (activación o desactivación de nota, variaciones de todo, etc.). El controlador más familiar a los músicos tiene forma de teclado de piano, al ser este instrumento el más utilizado a la hora de componer e interpretar las obras orquestales; sin embargo, hoy día se han construido todo tipo de instrumentos con capacidad de transmisión vía interfaz MIDI: guitarras, parches de percusión, clarinetes electrónicos, incluso gaitas MIDI.
 - **Teclado maestro:** De aspecto similar a un sintetizador, pero sin sonidos propios. Emplea siempre los de un dispositivo remoto. En realidad, cualquier tipo de teclado maestro puede convertirse en master si es utilizado para la ejecución de secuencias musicales cuyos instrumentos utilizados son de otros dispositivos. Muchas configuraciones emplean un único teclado conectado a módulos de sonido.
2. **Unidades generadoras de sonido:** También conocidas como módulos de sonido, reciben mensajes MIDI y los transforman en señales sonoras (recordemos que MIDI no transmite audio, sino paquetes de órdenes en formato numérico).
3. **Secuenciadores:** No son más que aparatos destinados a grabar, reproducir o editar mensajes MIDI. Pueden desarrollarse bien en formato de hardware, bien como software de computadora, o bien incorporados en un sintetizador. Se trata de la emulación de las funciones que realizaba un grabador multipista.

Estos son los tres grandes tipos de aparatos MIDI. Aún así, podemos encontrar en el mercado aparatos que reúnen dos o tres de las funciones descritas. Por ejemplo, los órganos electrónicos disponen de un controlador (el propio teclado) y una unidad generadora de sonido; algunos modelos también incluyen un secuenciador.

- **Codificación de la música mediante el sistema MIDI**

El MIDI se basa en un sistema de mensajes para codificar la información musical, que pueden ser de dos tipos: mensajes de canal y mensajes de sistema. El usuario no es necesario que conozca a fondo el significado de todos los mensajes, ya que los aparatos y los programas los generan y los interpretan automáticamente.

El byte MIDI, a diferencia de los bytes estándar de ocho bits de las computadoras, está compuesto por diez bits que se envían/reciben a una velocidad de 31250 bits/segundo con una tolerancia de +/- 1% según el estándar. El primero es el bit de inicio (*start bit*, que siempre es 0) y el último el bit de terminación (*stop bit* que siempre es 1). Esto con el fin de que los dispositivos MIDI puedan llevar la cuenta de cuantos bytes se han enviado o recibido. Los ocho bits restantes contienen los mensajes MIDI.

Existen dos tipos de bytes: De estado y de información. Se diferencian por el primer bit: si es un 1, tenemos un byte de estado, y si es un 0, es un byte de datos. Al generar un mensaje MIDI, por norma general, siempre enviamos un byte de estado, que puede estar seguido de cierta cantidad de bytes de datos. Por ejemplo, podemos enviar un primer mensaje de estado 'activar nota', seguido de un byte de datos informado qué nota es la que se activa. En algunas ocasiones y según el dispositivo midi que se trate, puede ocurrir que se omita el byte status si es idéntico al anterior. Por ejemplo, si tocamos la tecla 'do' de un piano mandaría:

```
1001xxxx (note on)
00111100 (valor 60 que corresponde a la nota do central "C3")
0xxxxxxx (la velocidad con la que haya sido apretada la tecla)
```

Pero al soltarla, puede omitir el byte status y apagarla por volumen (otra posibilidad es que usase el 1000xxxx (note off) para apagarla). Es decir transmitiría sólo los dos siguientes bytes:

```
00111100 (valor 60 que corresponde a la nota do central "C3")
00000000 (la velocidad cero, que indica que tiene que dejar de sonar esa nota)
```

Omitiendo así el byte status. Es más, si nuevamente pulsamos la tecla do, volvería a omitir el byte status.

A su vez, los mensajes de estado se dividen en dos grupos: mensajes de canal y mensajes de sistema. Los mensajes de canal se envían a un dispositivo específico, mientras que los mensajes de sistema son recibidos por todos los equipos.

Los **mensajes de canal** hacen referencia a una acción musical en un determinado instrumento. Hay 16 canales posibles, esto significa que un sintetizador puede actuar como una "orquesta" de 16 músicos, cada uno de los cuales recibe una información individualizada de aquello que ha de interpretar.

Los **mensajes de sistema** afectan al comportamiento general de todo el dispositivo y no solamente a los de un canal específico. Los más utilizados acostumbra a ser:

- Los mensajes comunes sirven para fijar parámetros como la afinación general, el tempo, la reverberación...
- Los mensajes de sistema exclusivo son especiales para cada marca y modelo de sintetizador, y sirven para acceder a funciones muy especiales específicas de cada sintetizador: mostrar un mensaje al display del teclado, activar un efecto especial, reiniciar el aparato...

En la siguiente tabla tenemos una lista con todos los mensajes disponibles:

Tabla 1. Mensajes MIDI	
Byte estado	Descripción
1000cccc	Desactivación de nota
1001cccc	Activación de nota
1010cccc	Postpulsación polifónica
1011cccc	Cambio de control
1100cccc	Cambio de programa
1101cccc	Postpulsación monofónica de canal
1110cccc	Pitch
11110000	Mensaje exclusivo del fabricante
11110001	Mensaje de trama temporal
11110010	Puntero posición de canción
11110011	Selección de canción
11110100	<i>Indefinido</i>
11110101	<i>Indefinido</i>
11110110	Requerimiento de entonación
11110111	Fin de mensaje exclusivo
11111000	Reloj de temporización
11111001	<i>Indefinido</i>
11111010	Inicio
11111011	Continuación
11111100	Parada
11111101	<i>Indefinido</i>
11111110	Espera activa
11111111	Reseteo del sistema

Los primeros bytes, cuyos últimos cuatro bits están marcados como 'cccc', se refieren a mensajes de canal; el resto de bytes son mensajes de sistema.

Canales MIDI

La norma MIDI especifica 16 canales para la transmisión de datos entre dispositivos por puerto MIDI OUT. Como se comentó con anterioridad, MIDI está pensado para comunicar un único controlador con varias unidades generadoras de sonido (cada una de las cuales puede tener uno o varios instrumentos sintetizados que deseemos utilizar), todo por un mismo medio de transmisión. Es decir, todos los aparatos conectados a la cadena MIDI reciben todos los mensajes generados desde el controlador. Ello hace necesario un método para diferenciar cada uno de los instrumentos. Este método es el denominado *canal*.

MIDI puede direccionar hasta 16 canales (también llamados voces, o instrumentos); por ello, al instalar el sistema MIDI será necesario asignar un número de canal para cada dispositivo.

Modos MIDI

Dentro del sistema MIDI, se decidió crear una serie de diferentes modos de funcionamiento, cada uno con ciertas características. Antes de verlo, debemos diferenciar entre los siguientes conceptos:

- *Monofónico*: un instrumento monofónico sólo puede reproducir una nota simultáneamente. Es decir, para reproducir una nueva nota debe primero dejar de sonar la anterior. Por ejemplo, los instrumentos de viento son monofónicos, ya que sólo reproducen un único sonido cada vez.
- *Polifónico*: un instrumento polifónico puede reproducir varias notas simultáneamente. Un ejemplo es un piano, que puede formar acordes por medio de hacer sonar dos o más notas a la vez.

Una vez aclarado este aspecto, podemos resumir los modos MIDI en la siguiente tabla:

Tabla 2. Modos de funcionamiento MIDI		
Número	Nombre	Descripción
1	Omni on / poly	Funcionamiento polifónico sin información de canal
2	Omni on / mono	Funcionamiento monofónico sin información de canal
3	Omni off / poly	Funcionamiento polifónico con múltiples canales
4	Omni off / mono	Funcionamiento monofónico con múltiples canales

Los dos primeros modos se denominan "Omni on". Esto se debe a que en esos modos la información de canal está desactivada. Esas configuraciones se reservan para configuraciones donde sólo utilicemos un instrumento. Los otros dos modos, "Omni off", sí admiten la información de canal.

- **General MIDI**

Especificación para sintetizadores la cual exige una serie de requisitos que van más allá del MIDI estándar.

Mientras MIDI es un protocolo que asegura la interoperabilidad entre distintos instrumentos musicales, GM va más allá: por un lado exige que todos los instrumentos compatibles con GM cumplan unas características. Así, por ejemplo que sean capaces de tocar al menos 24 notas simultáneamente. Además, conlleva ciertas interpretaciones de muchos parámetros y mensajes de control que en MIDI no se especificaban, como la definición de los sonidos de los instrumentos para cada uno de los 128 sonidos posibles. Es decir, GM define realmente que sonidos se pueden crear en el ordenador y cómo van a ser esos enviados al procesador para que emita los sonidos.

Sin embargo, aunque GM especifique qué instrumento corresponde con cada número de programa, no especifica la sintetización que se debe llevar a cabo para cada instrumento. Como consecuencia las técnicas usadas para generar dicho instrumento pueden ser tan distintas que el sonido final generado por un mismo instrumento puede variar de un sintetizador a otro.

La primera estandarización de General Midi fue en 1991. A lo largo de todo este tiempo el General Midi se ha ido extendiendo hasta tal punto que ciertas empresas han creado sus propias extensiones como es el caso de Roland GS extensions y Yamaha's XG. La última revisión del GM llegó con GM level2 en 1999.

Estos son los 128 instrumentos de la especificación estándar de MIDI, también conocidos como GM o "General Midi"

- 00 - Piano de cola acústico
- 01 - Piano acústico brillante
- 02 - Piano de cola eléctrico
- 03 - Piano de cantina
- 04 - Piano Rhodes
- 05 - Piano con "chorus"
- 06 - Clavicordio
- 07 - Clavinet
- 08 - Celesta
- 09 - Carillón
- 10 - Caja de música
- 11 - Vibráfono
- 12 - Marimba
- 13 - Xilófono
- 14 - Campanas tubulares
- 15 - Salterio
- 16 - Órgano Hammond
- 17 - Órgano percusivo
- 18 - Órgano de rock
- 19 - Órgano de iglesia
- 20 - Armonio
- 21 - Acordeón
- 22 - Armónica
- 23 - Bandoneón
- 24 - Guitarra española
- 25 - Guitarra acústica
- 26 - Guitarra eléctrica (jazz)
- 27 - Guitarra eléctrica (limpia)
- 28 - Guitarra eléctrica (apagada)
- 29 - Guitarra saturada (overdrive)
- 30 - Guitarra distorsionada
- 31 - Armónicos de guitarra
- 32 - Bajo acústico
- 33 - Bajo eléctrico pulsado
- 34 - Bajo eléctrico punteado
- 35 - Bajo sin trastes
- 36 - Bajo golpeado 1
- 37 - Bajo golpeado 2
- 38 - Bajo sintetizado 1
- 39 - Bajo sintetizado 2
- 40 - Violín
- 41 - Viola
- 42 - Violoncello
- 43 - Contrabajo
- 44 - Cuerdas con trémolo
- 45 - Cuerdas con pizzicato
- 46 - Arpa
- 47 - Timbales
- 48 - Conjunto de cuerda 1
- 49 - Conjunto de cuerda 2
- 50 - Cuerdas sintetizadas 1
- 51 - Cuerdas sintetizadas 2
- 52 - Coro Aahs
- 53 - Voz Oohs
- 54 - Voz sintetizada
- 55 - Éxito de orquesta
- 56 - Trompeta
- 57 - Trombón
- 58 - Tuba
- 59 - Trompeta con sordina
- 60 - Corno francés (trompa)
- 61 - Sección de bronces
- 62 - Bronces sintetizados 1
- 63 - Bronces sintetizados 2
- 64 - Saxo soprano
- 65 - Saxo alto
- 66 - Saxo tenor
- 67 - Saxo baritono
- 68 - Oboe
- 69 - Corno inglés
- 70 - Fagot
- 71 - Clarinete
- 72 - Flautín
- 73 - Flauta
- 74 - Flauta dulce
- 75 - Flauta de pan
- 76 - Cuello de botella
- 77 - Shakuhachi (flauta japonesa)
- 78 - Silbato
- 79 - Ocarina
- 80 - Melodía 1 (onda cuadrada)
- 81 - Melodía 2 (diente de sierra)
- 82 - Melodía 3 (órgano de vapor)
- 83 - Melodía 4 (siseo órgano)
- 84 - Melodía 5 (charanga)
- 85 - Melodía 6 (voz)
- 86 - Melodía 7 (quintas)
- 87 - Melodía 8 (bajo y melodías)
- 88 - Fondo 1 (nueva era)
- 89 - Fondo 2 (cálido)
- 90 - Fondo 3 (polisintetizador)
- 91 - Fondo 4 (coro)
- 92 - Fondo 5 (de arco)
- 93 - Fondo 6 (metálico)
- 94 - Fondo 7 (celestial)
- 95 - Fondo 8 (escobillas)
- 96 - Efecto 1 (lluvia)
- 97 - Efecto 2 (banda sonora)
- 98 - Efecto 3 (cristales)
- 99 - Efecto 4 (atmósfera)
- 100 Efecto 5 (brillo)
- 101 Efecto 6 (duendes)
- 102 Efecto 7 (ecos)
- 103 Efecto 8 (ciencia ficción)
- 104 Sitar
- 105 Banjo
- 106 Shamisen
- 107 Koto
- 108 Kalimba
- 109 Gaita
- 110 Violín celta
- 111 Shanai
- 112 Campanillas
- 113 Agogó
- 114 Cajas metálicas
- 115 Caja de madera
- 116 Caja Taiko
- 117 Timbal melódico
- 118 Caja sintetizada
- 119 Platillo invertido
- 120 Trasteo de guitarra
- 121 Sonido de respiración
- 122 Playa
- 123 Piada de pájaro
- 124 Timbre de teléfono
- 125 Helicóptero
- 126 Aplauso
- 127 Disparo de fusil

4. SÍNTESIS DE SONIDO

• Introducción y definición

Los sintetizadores son instrumentos musicales electrónicos capaces de generar sonido manipulando en tiempo real diversos parámetros (intensidad, tono, timbre y componentes de la envolvente). Los sintetizadores son polifónicos y pueden ser politémbricos (para cada voz), con lo que se parecen a los instrumentos tradicionales.

Los sintetizadores se basan en los osciladores, que son circuitos que permiten generar ondas simples (sinusoidal, cuadrada, diente de sierra, triangular...) y que permiten afinar de forma musical esas ondas generadas, dependiendo de la tecla pulsada. Como el sonido de una onda sinusoidal no es demasiado interesante, los síntes suelen incluir más de un oscilador, de esta forma podemos mezclar una onda cuadrada y una sinusoidal para formar un sonido nuevo: una forma de onda más compleja. Así, veremos que cuanto más compleja es la forma de onda más interesante es el sonido. Esto es así porque tiene más contenido en frecuencia.

La síntesis del sonido es la conjunción de tres componentes:

- Los **osciladores** generan el tono fundamental del sonido. Son los módulos VCO (Voltage Controlled Oscillator) u osciladores por control de tensión, que producen una serie de fluctuaciones de tensión que son la representación eléctrica de la frecuencia de las vibraciones.
- Los **filtros** modelan el sonido y generan aproximadamente el timbre. Son los módulos VCF (Voltage Controlled Filter) o filtros por control de tensión. Filtran ciertas frecuencias en beneficio de otras. Los VCF más importantes son los lowpass o filtros de paso bajo que filtran las frecuencias altas dejando pasar las bajas y los highpass o filtros de paso alto que filtran las frecuencias bajas dejando pasar las altas. Los filtros están caracterizados por el punto de corte (Cut Off) que cortará las frecuencias que sean inferiores o superiores a este valor.
- Los **amplificadores** regulan el volumen y por tanto intervienen sobre la intensidad del sonido. Son los módulos VCA (Voltage Controlled Amplifier) o amplificadores por control de tensión. Las variaciones de tensión alteran el valor de la ganancia que adquirirá la señal.

Existen módulos adicionales controladores que perfilan aún más la onda producida: el **generador de envolvente** y el **oscilador de baja frecuencia** (LFO). El generador de envolvente permite controlar los cuatro parámetros de la envolvente: ataque (A), caída (C), parte sostenida (S) y extinción (R) o incluso combinaciones selectivas hablándose de AR, ADR, DADSR.

La arquitectura clásica de los sintetizadores está basada en la síntesis sustractiva, cuyo nombre procede del hecho de que los timbres de las notas se conforman eliminando o filtrando armónicos. Existen otras tecnologías de síntesis como la síntesis aditiva, que recompone las formas sonoras desde cero controlando la amplitud de cada armónico de los 16 o 32 existentes por tono lo que demanda cálculo intensivo y la síntesis FM que modula las frecuencias de uno o varios osciladores con las de otros, etc.

La naturaleza de los osciladores define qué tipo de sintetizador estamos usando. Por ejemplo si los osciladores pudiesen 'disparar' grabaciones de audio de instrumentos reales en vez de generar ondas sencillas, hablaríamos de un *Sampler*: sintetizador cuyos osciladores son grabaciones digitales de otros instrumentos, almacenadas en memoria RAM, en la que además podemos cargar o grabar nuestras propias fuentes para ser usadas como osciladores. En cambio, si las grabaciones están en ROM, hablamos de un sintetizador por tabla de ondas o PCM, también llamado hoy en día ROMpler. Otro ejemplo de cómo los osciladores definen la síntesis de sonido lo encontramos en la síntesis FM, en la que 2 o más osciladores pueden disponerse de distintas formas (interconectarlos entre ellos) formando algoritmos.

- **Armónicos y formas de onda**

Las **ondas periódicas** son aquellas ondas que muestran periodicidad respecto del tiempo, esto es, describen ciclos repetitivos. En una onda periódica se cumple:

$$x_a(t) = x_a(t + T_p) = x_a(t + nT_p)$$

donde el periodo propio fundamental $T_p = 1 / F$, F es la frecuencia de la componente fundamental de la onda periódica y n un número entero.

Toda onda periódica es, por definición, una *onda determinista*, por cuanto puede ser descrita matemáticamente (mediante un modelo matemático).

La forma más simple de onda periódica es la onda armónica (sinusoidal), que se describe matemáticamente:

$$x_a(t) = A \text{ sen } (\Omega t + \varphi)$$

Esta onda está completamente caracterizada por tres parámetros: A es la amplitud de la sinusoide, Ω es la frecuencia en radianes por segundo (rad/s), y φ es la fase en radianes. En lugar de Ω , a menudo se utiliza la frecuencia F ciclos por segundo o hercios (Hz), donde $\Omega = 2 \pi F$

Sin embargo, el modelo descrito para las ondas armónicas no sirve para describir estructuras periódicas más complicadas: las ondas anarmónicas. Joseph Fourier demostró que las ondas periódicas con formas complicadas pueden considerarse como suma de ondas armónicas (cuyas frecuencias son siempre múltiplos enteros de la frecuencia fundamental). Así, supongamos que $x_a(t)$ representa el desplazamiento periódico de una onda en una cierta posición. Si $x_a(t)$ y su derivada son continuas, puede demostrarse que dicha función puede representarse mediante una suma del tipo:

$$x_a(t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \text{ sen } (n \Omega t + \varphi_n)$$

El proceso de determinación matemática de los coeficientes A_n y las constantes de fase φ_n , para una forma de onda dada se llama análisis de Fourier. Al igual que una forma de onda periódica puede analizarse como una serie de Fourier mediante las contribuciones relativas de la frecuencia fundamental y los armónicos superiores presentes en la forma de onda, también es posible construir nuevas formas de onda periódicas, sumando a la frecuencia fundamental distintas contribuciones de sus armónicos superiores. Este proceso se denomina síntesis de Fourier.

Es importante notar que para las señales de ancho de banda limitado (en la práctica, todas las de interés en Telecomunicaciones) la suma de armónicos es también finita:

$$x_a(t) = \sum_{n=1}^N A_n \text{ sen } (n \Omega t + \varphi_n)$$

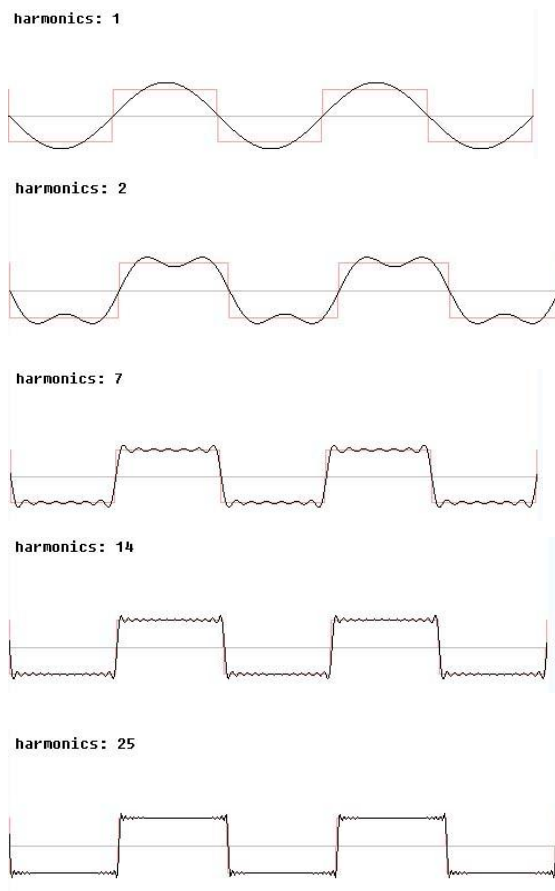
siendo N el número total de armónicos de los que se compone la onda periódica. El armónico de frecuencia más baja se denomina primer armónico o armónico de frecuencia fundamental ($n = 1$, por tanto de amplitud A_1 , frecuencia Ω y fase φ_1). De hecho, el caso más simple, el de una onda armónica, es un caso particular para un único armónico ($N = 1$). Otros casos requieren un número infinito de armónicos que sólo pueden existir en sus formas perfectas como abstracciones matemáticas debido a que en la naturaleza no se pueden crear o transmitir señales de ancho de banda infinito. Sin embargo, incluso sus aproximaciones (descritos como la suma de un número limitado de armónicos) son de gran interés en la práctica, especialmente en Telecomunicaciones.

Entre estos casos de señales periódicas compuestas por infinitos armónicos se encuentran las ondas cuadradas (onda compuesta exclusivamente por armónicos impares cuya amplitud es inversamente proporcional al número de armónico, es decir,

$$x_a(t) = \frac{4A}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} \text{sen} [(2n-1)\Omega t + \phi],$$

o las triangulares.

Ejemplo de síntesis de una onda cuadrada a partir de la adición de sus componentes armónicas:



La onda final resultante sólo es una aproximación debido al uso de un número finito de componentes armónicos: en total, 25.

El último gráfico de la secuencia (harmonics: 25) puede ser descrito como:

$$x_a(t) = \frac{4A}{\pi} \sum_{n=1}^{25} \frac{1}{2n-1} \text{sen} [(2n-1)\Omega t + \pi]$$

Esta propiedad demostrada por Fourier sobre las ondas periódicas es importante en el estudio de la Teoría de la Información, y muy especialmente, en la demostración del Teorema de muestreo de Nyquist-Shannon. Este teorema demuestra que toda onda periódica limitada en banda (limitada a componentes armónicos por debajo de una frecuencia máxima conocida) puede ser descrita en su totalidad y sin ambigüedad por una serie de muestras no cuantificadas si se cumple que la frecuencia de muestreo es superior (nunca igual) al doble de la frecuencia del último armónico que puede contener la onda.

La naturaleza de un sonido

Entonces... la forma de onda define los armónicos, y ¿los armónicos determinan la forma de onda? Claramente, los armónicos y formas de onda son sólo dos formas de expresar la misma cosa. Este es el punto clave: la naturaleza o clase de los tonos musicales está definida por los números y amplitudes de los armónicos contenidos en ellos, y cualquiera relación de armónicos resulta una forma de onda concreta. Así, cuando miramos a los osciladores de un sinte y vemos botones como onda cuadrada y diente de sierra, es simplemente una forma rápida de decir: “este control genera una relación concreta de armónicos con distintas amplitudes de ‘x’, ‘y’, y ‘z’”.

- **El oscilador**

Cuando usamos un equipo electrónico podemos asegurar que en el noventa por cien de las ocasiones estamos usando un oscilador, el cual realiza la función más importante en el equipo, es 'su corazón', sin el cual nada puede cambiar.

Es un circuito que es capaz de generar a su salida una forma de onda estable, periódica y con una frecuencia determinada. Para poder ser utilizado como generador de sonido; un oscilador debe ser controlable. Existen osciladores controlados por tensión, osciladores controlados digitalmente y los simulados mediante software.

Las formas de onda que generan estos osciladores son las siguientes:

- Pulso

Una característica importante de esta forma de onda, es que la anchura es variable. Conforme la anchura del pulso decrece, el sonido tiende a hacerse más nasal y fino, alejándose del típico sonido hueco del clarinete, representado por la onda cuadrada. Podríamos decir que el sonido nos recuerda más al oboe o fagot. El sonido de la onda Pulso es propio para patches 'electrónicos' de sonido impersonal, como de personaje secundario. Conforme se va estrechando la onda de pulso y su sonido se va haciendo más delgado, su uso ideal es para imitar instrumentos como 'juguetes electrónicos'. Naturalmente, los cambios posteriores que se puedan hacer a lo largo del recorrido de la señal, cambiarían drásticamente ésta. La anchura de pulso puede modularse en tiempo real, por medio de un LFO. Este proceso se ha venido a llamar "Pulse width modulation" PWM, y es común encontrarse controles en los sintetizadores que lo designen.

- Triangular

Podríamos definir la onda Triangular como una onda Senoidal un poco enriquecida. Si observamos el diagrama representativo de sus armónicos, éstos casi se corresponden con los de la cuadrada, pero con una presencia mucho más sutil (menor amplitud). Su utilidad la encontramos cuando queremos acercarnos a sonidos suaves, tipo flauta o "pads" electrónicos de escaso relieve, más pictóricos que protagonistas. Como sus armónicos son muy pobres, el filtro tendrá escaso rendimiento sobre ella. Otro actor secundario, pero no por ello menos útil.

- Senoidal

La onda Senoidal se sitúa, por sus características, en las antípodas de la síntesis analógica. La razón es muy sencilla. La síntesis analógica es Sustractiva, es decir, se basa en ir eliminando unos y por lo tanto resaltando otros armónicos del espectro. ¿Qué vamos a filtrar pues en una onda que no tiene armónicos? Paradójicamente, esa pureza de sonido es lo que hace de este tipo de onda, el elemento esencial de la síntesis FM. Con razón podrías preguntarte entonces que uso se le puede dar. Pues bien, actualmente los usos giran en torno a la construcción de patches de subgraves en géneros como el techno o el drum 'n' bass. Allá en los albores de la música ambient, Brian Eno las utilizó generando paisajes de música calma.

- Diente de Sierra

La onda Diente de Sierra, ofrece más armónicos que cualquier otra, lo que la hace indispensable en la síntesis sustractiva. En realidad podríamos calificarla como rica en armónicos, pues los tiene todos y por lo tanto rica en posibilidades de ser tratada. Su sonido generalmente será brillante y se utiliza para programar todo tipo de sonido: pads, cuerdas, metales y, en el terreno de lo estrictamente electrónico, "leads" gruesos y con pegada. Especialmente indicada también para efectos de apertura de filtro tipo "wha wha" relacionados con la presión de tecla y cambios en la frecuencia de corte y la resonancia. Como todo protagonista, y esta onda lo es, requiere espacio y comparte mal el campo sonoro. No pretendas hacer disputar el protagonismo a dos o más leads poderosos. Se pelearán todo el tiempo.

- Cuadrada

Actualmente, la onda Cuadrada, se considera una forma particular de onda de Pulso, con una relación de igualdad entre las partes. Tradicionalmente se relaciona la onda cuadrada con el sonido del clarinete: oscuro, hueco y sinuoso. Muy útil para sonidos "electrónicos" de segundo plano.

- Ruido

Entendemos por "Ruido" una señal aleatoria con una cantidad igual de frecuencias al mismo volumen y sin una altura específica. Su utilidad se centra en la imitación de sonidos naturales de lluvia, mar o viento. Además se emplea para emular platos, hi-hats y otros instrumentos de percusión.

- **Envolvente**

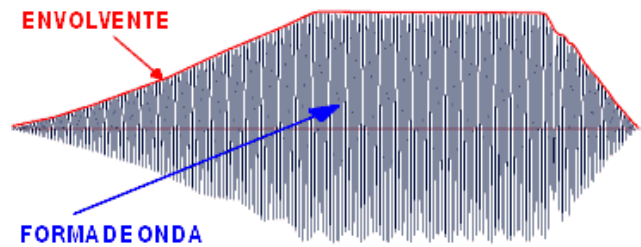
Una de las características más importantes que diferencia un sonido de otro es la evolución de la amplitud, volumen o potencia del sonido a través del tiempo, es decir desde el ataque o aparición del sonido hasta que se extingue. A esto se lo denomina envolvente porque puede trazarse una curva uniendo todos los picos o valores máximos del sonido que envuelve a la forma de onda.

En la siguiente figura se aprecia la envolvente de un piano la cual tiene un ataque fuerte, no se mantiene el sonido sino que se extingue lentamente:



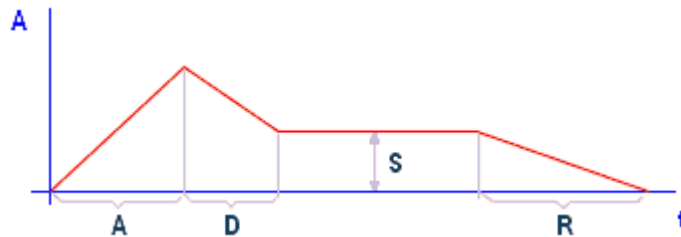
Envolvente de un sonido de Piano

La siguiente figura muestra la envolvente de un violín la cual tiene un ataque suave, luego se sostiene a un volumen mientras se frota la cuerda y finalmente al soltar el arco se extingue más rápido que el ataque:



Envolvente de un sonido de Violín

Para el caso de los sintetizadores la envolvente suele simplificarse en cuatro pasos: Attack, Decay, Sustain y Release (ataque, decaimiento, sostenido y relajación). El ataque es el tiempo que tarda el sonido en alcanzar su máxima amplitud. El decaimiento es el tiempo que el sonido tarda en alcanzar el nivel de sostén al que se mantendrá mientras se mantenga presionada la tecla o se frote una cuerda o se sople un instrumento de viento. La relajación es el tiempo que tarda en apagarse completamente el sonido una vez que se suelta una tecla o cuerda.



Envolvente tipo ADSR - Attack Decay Sustain Release

- **Síntesis analógica vs Síntesis digital**

Para encontrar los primeros sintetizadores de sonido debemos remontarnos a 1906, año de invención del Telharmonium. Más adelante, en los años 20 surgen el Theremin y las Ondas Martenot. Estos primeros aparatos eran evidentemente analógicos, y utilizaban osciladores eléctricos como fuente sonora. Sin embargo, los primeros intentos de síntesis digital tampoco datan de ayer ya que son, de hecho, casi tan viejos como los propios ordenadores: Max V. Mathews, padre indiscutible de toda la síntesis digital, generó los primeros sonidos, en los laboratorios de IBM, en 1957.

En aquella época, la escasa potencia de aquellos ordenadores hacía totalmente inviable la comercialización de sintetizadores digitales, por lo que las dos décadas siguientes vieron la eclosión de los sintetizadores analógicos, que comenzaron a fabricarse comercialmente y marcaron una época en el pop de principios de los setenta (Pink Floyd, Keith Emerson, Tangerine Dream, Stevie Wonder, etc.).

La síntesis analógica se inicia en los años 60 con la aparición del Moog Modular synthesizer de la mano de Bob Moog en 1964. Sus competidores fueron la propia RCA (donde Moog empezó trabajando como ingeniero), cuyos prototipos no superaban a los Moog, y Buchla, quien ya en el 63 comercializó la Electric Music Box. Pero fue el sintetizador de Moog el más intuitivo, y además de menor tamaño, el que en poco tiempo definió un standard en los controles, lo que permitió a los sintes de otras marcas operar simultáneamente. Sin duda uno de los trabajos discográficos que más impactó a los músicos de la época fue el 'Switched-on Bach' de Wendy Carlos. Esto hizo a los Moog ganar más campo de mercado que a Buchla. En 1970 aparece el Minimoog, primer sinte pre-patchado, portátil, con teclado integrado y mucho más fácil de usar. Esta normalización consolida a Moog vendiendo más de 12.000 ese año. Los sintetizadores electrónicos se convierten rápidamente en un standard de la música. A lo largo de los 70, vinieron la serie CS de Yamaha y el Four-Voice de Oberheim, incluían la grabación de la posición de los knobs en una memoria digital. Más tarde, el Prophets 5 de Sequential Circuits fue el primero en incluir un microprocesador como controlador y el primer sinte polifónico. Además era compacto y ligero. En 1978, nace el Fairlight CMI y es primer sintetizador polifónico que incluye la técnica del sampling. Ahora ya se podía contar con muestras pre-grabadas. Peter Gabriel, Duran Duran o Stevie Wonder fueron varios de los primeros compradores.

Tres años antes, en 1975, y como antesala a los sintetizadores completamente digitales, John Chowning desarrolla la Síntesis FM con el programa MUSIC IV (descendente directo del MUSIC creado por Max Mathews), y da la patente a Yamaha. Tras las series GS y CE, llega la tercera generación de sintes digitales de Yamaha, la serie DX. Así, los sintes analógicos tienen su auge hasta principios de los 80, cuando se populariza la síntesis digital de Max Mathews, desbancando a los anteriores.

En 1983 surge el DX7 de Yamaha, primer sintetizador digital comercial, y en pocos años los sintetizadores digitales desbancarían a los analógicos. DX7 y DX9 fueron un éxito comercial. Ambos modelos eran compactos, de precio razonable y con tecnología digital integrada para producir síntesis FM. El DX7 fue el primer sinte completamente digital que apareció en el mercado de masas. Fue indispensable para muchos artistas de los 80, y rápidamente la demanda superó a la oferta. Vendió 200.000 máquinas en tres años.

Tras el éxito de la síntesis FM, Yamaha firma con la Universidad de Stanford en 1989 para desarrollar conjuntamente la Síntesis de Tabla de Ondas. Así, el Yamaha VL1 fue primer sinte de modelado físico y vio la luz en 1994.

Por su versatilidad, la síntesis digital permite el uso de infinitas técnicas de síntesis y emular, de hecho, cualquiera de las técnicas analógicas. Hoy en día también se combinan ambas técnicas, con los sintes de modelado analógico. Emulan los sonidos tradicionales de los sintes analógicos, mediante el procesado de las señales en digital.

Actualmente, la emulación mediante software de los grandes sintes clásicos, así como plugins para EQ, compresión y distintas más funciones, ganan terreno al hardware, dando forma a un Home Studio semi-profesional basado en un solo ordenador. Hablemos ahora de este software.

- **VSTs**

Desarrollado por Steinberg (Yamaha), la Virtual Studio Technology es un interfaz software que integra un sintetizador de audio y plugins de efectos con editores de audio y sistemas de grabación en disco duro. Emplea el DSP para simular el hardware de estudio tradicional, mediante software.

El año 1996 es el año de la revolución. VST es incorporado a Cubase y se convierte en el primer software nativo que incorpora efectos, EQ, mezcla y automatizaciones. En este primer paquete de VSTs viene Neon, primer plugin de la marca.

En 1999 ve la luz la segunda versión de VST, que junto a también segunda versión de ASIO, crean una mejor integración de hardware y software. Audio Stream Input/Output (ASIO) es un protocolo de ordenador para audio digital también desarrollado por Steinberg, que provee una baja latencia y una interfaz de alta fidelidad entre el software, es decir, la aplicación, el hardware y la tarjeta de sonido. Mientras que el DirectSound de Microsoft es usado normalmente como entradas y salidas estéreo para usuarios no profesionales, ASIO permite a los músicos y técnicos de sonido trabajar el audio mediante Windows y el software en lugar de hardware externo.

En 2002 Steinberg presenta otra aplicación muy funcional: VST System Link. Permite la sincronización de distintos ordenadores dedicados al audio.

Generalmente se utilizan en una aplicación de trabajo o estación de trabajo digital de audio (DAW), añadiendo más funciones a esta. La mayoría de los plugins pueden ser clasificados como de instrumentos (VSTi) o de efectos (VST), aunque existen más categorías. Presentan unos gráficos similares a los controles físicos de los síntes hardware (en caso de que sean emulación de estos).

- **SDK**

A día de hoy, VST va por su tercera versión, ya disponible además su SDK.

Un software development kit (SDK) o kit de desarrollo de software es generalmente un conjunto de herramientas de desarrollo que le permite a un programador crear aplicaciones para un sistema concreto, por ejemplo ciertos paquetes de software, ordenador, sistemas operativos, etc.

Es algo tan sencillo como una interfaz de programación creada para permitir el uso de cierto lenguaje de programación. Así, todo aquel que sepa programar, puede ya crear instrumentos para esta última versión de VSTs.

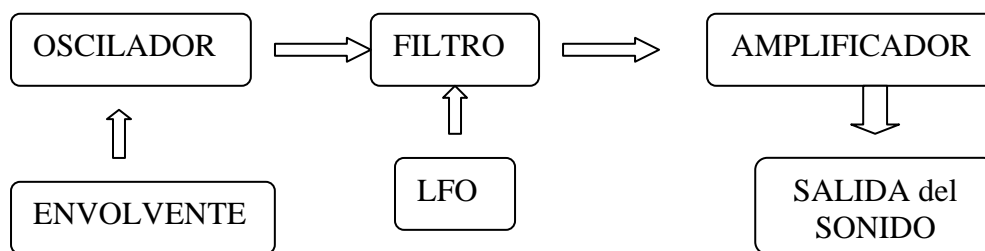
- **Tipos de síntesis**

- **Síntesis Sustractiva**

Se trata del método clásico de síntesis utilizado en la inmensa mayoría de sintetizadores analógicos y en muchos sintetizadores basados en la reproducción de muestras y samplers. Está asociada históricamente con los síntesis analógicos controlados por voltaje como el Moog.

La síntesis sustractiva se basa en tomar un sonido (o forma de onda), preferentemente que posea un espectro muy rico (por ejemplo, formas de onda diente de sierra, cuadrada o triangular) y hacerla pasar por un filtro y un amplificador modulables, de forma que se pueda alterar su timbre y dinámica. Es decir, normalmente se refiere a la configuración clásica “oscilador / filtro / amplificador”. Por ejemplo, tenemos un oscilador de diente de sierra, si ponemos a la salida un filtro paso bajo para apagar los agudos, generaremos un sonido más aproximado a un instrumento de cuerda, que si usáramos solamente el sonido de diente de sierra. Normalmente se puede controlar esta frecuencia de corte (cut-off), así como la resonancia (frecuencias atenuadas o aumentadas en ese punto de corte).


En el siguiente esquema podemos ver el recorrido de la señal en la síntesis sustractiva, cuyos elementos han sido descritos anteriormente:



En esta cadena de procesos, el sonido básico nace de un oscilador, al que pueden aplicársele filtros con los que se seleccionan las frecuencias deseadas. Esta señal puede ser afectada por las envolventes y el LFO, que les dan dinámica y expresividad. Finalmente, el sonido se amplifica y sale al exterior.

En un principio, esta cadena de procesos estaba separada; es por esto que los primeros sintetizadores eran modulares. Cada módulo realizaba una función en la síntesis, y los módulos podían interconectarse entre sí de muchas maneras. Sin embargo, siendo esta una solución muy flexible, resultaba demasiado complicada, y poco a poco pasó a estandarizarse una serie fija de módulos que se utilizaban siempre, conectados de la misma manera, y se integraron juntos en un solo sistema y un solo aparato. Seguramente esta fue la mayor aportación del Moog Minimoog, el sustractivo más famoso de la historia; así funcionan ahora la mayoría de los sintetizadores.

Ejemplos comerciales y artistas que los emplearon o emplean:

- **Moog modular** (1964): Rush, Wendy Carlos, Tomita, Tonto's Expanding Head Band, Emerson, Lake & Palmer, The Beatles.
 - **EMS VCS3** (1969): Estamos ante una de las leyendas de la síntesis, construido en 1969 por David Cockerell en los Electronic Music Studios, el **Voltage Controlled Studio** con 3 osciladores fue el primer sinte portátil del mundo. Los más oscuros sonidos de Pink Floyd en *Dark Side Of The Moon*, los más extraños aullidos del *Oxygène* de Jarre, y las delirantes voces metálicas de la serie Galáctica estaban bullendo en su interior, esperando a salir. Utilizado por Roxy Music, Hawkwind, Pink Floyd, Aphex Twin, The Orb, Future Sound Of London, Brian Eno, Jean Michel Jarre, The Who, Flood, Stereolab, el taller radiofónico de la BBC y muchos, muchos más.
- 
- Rick y Dave (Pink Floyd) en Abbey Road con sintes EMS
- **ARP 2600** (1970): The Who, Stevie Wonder, Weather Report, Edgar Winter, Jean-Michel Jarre, 808 State, Ellen Allien, Soulwax, The Chemical Brothers, David Bowie, Muse, Vince Clarke, Jackson Five, Joy Division, Kraftwerk, John Lennon, Nitzer Ebb, Mike Oldfield, Orbital, Underworld.
 - **Minimoog** (1970): Los Jaivas, Pink Floyd, Triana (banda), Rush, Yes, Emerson, Lake & Palmer, Stereolab, Devo, Ray Buttigieg, Rick Wakeman.
 - **ARP Odyssey** (1972): Respuesta de ARP al Minimoog, con sólo dos osciladores pero duofónico): ABBA, Ultravox, Gary Numan, Air, Tangerine Dream, 808 State, Apollo 440, Nine Inch Nails, Astral Projection, Vangelis, Elton John, Jethro Tull, DEVO, Kansas, R.E.M.
 - **Electronic Music Labs Electrocomp 101** (1972): Diseñado para competir con el ARP y el Minimoog. Utilizado por Skinny Puppy, Tommy Mars, Download, Weezer, Foreigner y Ohm.
 - **Yamaha GX-1** (1973): Emerson, Lake & Palmer, Led Zeppelin, ABBA, Stevie Wonder.
 - **Micromoog** (1975): Sinte muy sencillo, opción barata al Minimoog. Utilizado por Lendi Vexer.
 - **Moog Taurus** (1976): Sinte analógico de bajos con pedales controlados por los pies. Empleado por Michael Jackson, The Cure, Pink Floyd, Electric Light Orchestra, Yes, The Police, Genesis, The Police, U2...
 - **Sequential Circuits Prophet 5** (1978) (El primer sintetizador programable del mercado): Pink Floyd, Roxy Music, Phil Collins, The Cars, Jean Michel Jarre, Genesis, Steve Winwood, Paul Carrack, Modern Talking, Kraftwerk.
 - **Fairlight CMI** (1979): Jean-Michel Jarre, Jan Hammer, Peter Gabriel, Mike Oldfield, Pet Shop Boys, Nick Rhodes de Duran Duran, Stevie Wonder, Annie Lennox, Alan Parsons, David Gilmour, Mark Knopfler, Arthur Baker para Afrika Bambaataa, Brian Eno, U2, David Bowie. En España fue usado por Nacho Cano del grupo Mecano. Éxitos míticos como "Shock The Monkey" y "Sledgehammer" de Peter Gabriel, "Thriller" de Michael Jackson.
 - **Moog Source** (1981): Tangerine Dream, Jan Hammer, Depeche Mode, Devo, Vince Clarke, New Order, Ultravox, Josh Wink, Front Line Assembly, Moog Cookbook, Kitaro, Imperial Drag, The Cars, Phish, The Rentals, King Crimson, Blur y Gary Numan.
 - **Roland Jupiter-8** (1981): Duran Duran, OMD, Michael Jackson (Thriller), Depeche Mode, Jean Michel Jarre, The Human League, The Prodigy, David Bowie, Moby, William Orbit, Queen, Devo, Prince.
 - **Oberheim OB-Xa** (1981): Depeche Mode, Gary Numan, Jean Michel Jarre, New Order, Paul Sheaffer, Prince, Queen, Jethro Tull, Stevie Nicks, Sneaker Pimps, Rush, Mike Oldfield y Bon Jovi.
 - **Roland TB-303** (1982): Sintetizador secuenciador sobre todo utilizado en la música electrónica (Techno y House). En un principio (1982) fue ideado para los guitarristas, como bajo de acompañamiento para cuando tocaran solos, pero no se vendió muy bien y pasó desapercibido. Fue en Chicago en 1987 cuando en el tema Acid Trax de Phuture (Dj Pierre y Spanky) se emplea por primera vez este sinte en la música electrónica dando lugar al fenómeno y estilo Acid.
 - **Alesis Andromeda** (2000): Tiene osciladores y filtros analógicos combinados con controles digitales. Es considerado un híbrido entre nuevas y viejas tecnologías, pero todo el camino de la señal es analógico. Usado por BT, Air, Duran Duran, Depeche Mode, Nine Inch Nails, DJ Tiesto, Klaus Schultz, Yes y Pet Shop Boys.

- **Síntesis Aditiva**

Cualquier sonido, por complejo que sea, puede ser descrito como la suma de un determinado número de formas de onda senoidales que lo componen, cada una de ellas con diferentes fases y amplitudes. Estos son los parciales del sonido, que también reciben el nombre de armónicos si sus frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental.

El método para generar el espectro de un sonido complejo por medio de la suma de un determinado número de senoidales simples se denomina síntesis de Fourier.

Idealmente, para realizar síntesis de Fourier, son necesarios muchos osciladores que entreguen senoidales; su número dependerá del rango necesario y de la riqueza armónica del sonido que se busca.

Así, la expresión de la señal suma de señales, o serie de Fourier:

$$s(n) = \frac{1}{2} a_0(n) + \sum_{k=1}^{k_{\max}} a_k(n) \cos\left(\frac{2\pi f_0}{F_s} k_n\right) - b_k(n) \sin\left(\frac{2\pi f_0}{F_s} k_n\right)$$

donde

$$a_k(n) = r_k(n) \cos(\phi_k(n)) \cdot b_k(n) = r_k(n) \cdot \sin(\phi_k(n))$$

y F_s es la frecuencia de muestreo, f_0 la frecuencia fundamental y k_{\max} el armónico más alto por debajo de la frecuencia de Nyquist. El término de la componente continua DC no es conveniente en la síntesis musical, de forma que se puede eliminar el término a_0 . Al introducir los coeficientes variables $r_k(n)$ permite el uso dinámico de envolventes para modular los osciladores, creándose una forma de onda cuasi-periódica (es decir periódica a corto plazo pero que cambia a largo plazo). La síntesis aditiva puede también crear sonidos no armónicos si las parciales individuales no tienen todas una frecuencia que sea múltiplo de la misma frecuencia fundamental.

Para que el sonido entregado por un sintetizador que trabaje con síntesis aditiva sea capaz de ofrecer sonidos dinámicos y ofrezca una buena capacidad de expresividad, es necesario contar con control sobre varios parámetros; idealmente, cada oscilador debe contar con su propia envolvente de amplitud, envolvente de tono, sensibilidad a la velocidad y posibilidades de modulación.

Aunque pueda parecer que las necesidades de hardware son el factor que puede limitar la popularización de sintetizadores basados en síntesis aditiva, lo cierto es que la complejidad de su programación resulta ser el factor más decisivo. Muchos de los parámetros que se manejan en un sintetizador de estas características poseen una influencia casi inapreciable, desde el punto de vista auditivo, sobre el sonido resultante, y resulta muy complicado hacerse una imagen previa de qué aspecto debe tener el espectro del sonido que estamos buscando. Por ello, la emulación de instrumentos acústicos (o reales) se hace extremadamente difícil si no se dispone del adecuado software y hardware de análisis.

El órgano de iglesia también puede ser considerado un sintetizador aditivo porque cuando el aire pasa a través de los tubos se generan ondas senoidales que se añaden unas a otras para generar tonos. Más tarde llegaron los Hammond, los cuales en un principio fueron una opción barata a estos órganos de iglesia, pero pronto llegaron a ser un standard en la música jazz, blues y gospel. Imitaban la función de los tubos de estos órganos generando formas de onda desde ruedas de tono mecánicas (cada ruda genera un tono específico) que giraban enfrente de un receptor magnético. Aunque están incluidos en la categoría de órganos electrónicos, realmente son eléctricos o bien electro-mecánicos, porque las ondas son producidas por ruedas de tono mecánicas en vez de osciladores electrónicos.

Se ha demostrado recientemente que la síntesis por tabla de ondas es equivalente a la síntesis aditiva en el caso de que todos los parciales son armónicos. No todos los sonidos musicales tienen parciales armónicos (por ejemplo las campanas musicales), aunque la mayoría sí los tienen. En estos casos se puede conseguir una implementación de síntesis aditiva mediante la síntesis de tabla de ondas. Por otro lado, la síntesis aditiva de grupo es un método para agrupar parciales en grupos armónicos de diferentes frecuencias fundamentales para sintetizar cada grupo por separado (con síntesis de tabla de ondas) antes de mezclar el resultado final.

Ejemplos comerciales y artistas que los emplearon o emplean:

- **Synclavier** (1975): Sintetizador clásico de síntesis aditiva. Usado por The Cure, New Order, Sting, Stevie Wonder, Michael Jackson, Pink Floyd, Kraftwerk, Depeche Mode, Genesis, The Cars, Soft Cell...
- **Lyricon** (70s): Primer sintetizador de viento producido en masa. Tom Scott lo toca en Billie Jean de Michael Jackson.
- **Kurzweil K150** (1986): Más versátil, pero resulta mucho más difícil de programar.
- **Kawai** (1988): Limitado en cuanto a su arquitectura, pero su interface de programación es sencilla y comprensible. Usados por Kraftwerk, Chemical Brothers, Jean Michelle Jarre...

Implementaciones contemporáneas de la síntesis aditiva incluyen la serie K5000 de sintetizadores Kawai y, más recientemente, sintetizadores software como el Camaleón de Camel Audio y el Cube de VirSyn.

- **Síntesis de la consonante Vowel**

Después de fabricar calculadoras y demás gadgets electrónicos, en 1980 Casio se lanza al mercado de los teclados electrónicos. Su primera serie fue denominada Casiotone y usaba este primitivo tipo de síntesis de Vowel. Trata de simular el sonido de otros instrumentos, aunque no con mucha precisión. Es un híbrido de entre la síntesis analógica y la digital. Emplea dos formas de onda digitales que son mezcladas y filtradas un por filtro paso bajo, con diferentes cortes dependiendo del preset. La mayoría de teclados eran pequeños, con teclas diminutas para los niños, sin ir dirigidos a los músicos. Normalmente contenían un generador de ritmos, con varios patrones seleccionables por el usuario.

A medida que se fueron mejorando los tipos de síntesis, los Casiotone se fueron dejando de fabricar, pero su bajo precio y abundancia hicieron que se usaran mucho por las bandas garage. Así, surgieron tres tipos de Casios, dependiendo de su método de síntesis. Esta primera de Vowel, más tarde la síntesis según la función de Walsh, y después la más profesional, con la serie CZ, usando la distorsión de fase.

Ejemplo y artistas:

Casio MT-65: Krisma, Hot Chip...

- **Síntesis basada en la función de Walsh**

La función de Walsh es una función ortogonal a través de la cual generamos todo tipo de señales. Existen diversos conjuntos de funciones ortogonales, sin embargo, se utiliza normalmente el conjunto de funciones sinusoidales seno coseno. Existe también el conjunto de funciones de Walsh, que permite generar cualquier función periódica. Las funciones de Walsh son no lineales, sin embargo su generación es más fácil que las funciones sinusoidales, sobre todo dada la tecnología digital actual. Es posible generar cualquier función periódica en base a una suma ponderada de las funciones de Walsh.

Ejemplo y artistas:

Casio VL-TONE o VL-1: Stevie Wonder, Trio, Beastie Boys

- **Síntesis de Distorsión de Fase**

Los términos distorsión de fase (PD) y distorsión de fase interactiva (iPD) fueron acuñados por Casio en 1984 para sus sintetizadores, concretamente para las series CZ y VZ. Es matemáticamente casi idéntica a la FM de Yamaha, aunque implementada de forma ligeramente distinta para evitar pagar la patente. Básicamente, una onda senoidal es generada, pero modificando su ángulo de fase, conseguimos cierta inclinación.

Fue desarrollada por el ingeniero de Casio Mark Fukuda y evolucionada desde el Cosmo Synth System del legendario compositor y experto en síntesis Isao Tomita. Yukihiro Takahashi (vocalista de la Yellow Magic Orchestra) también formó parte de este desarrollo, de hecho incluyó un CZ-1 en su tour por Japón de 1986.

Para hacer los sintes accesibles a todo tipo de público, Casio usaba síntesis digital sin implementar el filtro característico de la síntesis sustractiva. Así, su sonido era más 'delgado' que un sinte analógico. Sin embargo, en la línea CZ usaron la distorsión de fase para de alguna manera simular un filtro analógico, les dotaron de 8 diferentes formas de onda, cada una de ellas podía y puede transformarse de forma continua con la ayuda de una envolvente de ocho pasos, emulando así el comportamiento del filtro pasa bajo similar al que incorpora un sintetizador analógico básico. Se utilizan otras dos envolventes para el tono y la amplitud y se dispone de posibilidad de modulación en anillo.

Ejemplo y artistas:

Casio CZ-101 (1984): Cirrus, Moby, Jimi Tenor, Vince Clarke, Jimmy Edgar...

- **Síntesis FM**

Normalmente, la modulación en frecuencia se abrevia como FM o AFM (para Advanced Frequency Modulation). Este tipo de síntesis fue en gran medida el responsable de la gran expansión comercial de los sintetizadores digitales durante la segunda mitad de la década de los 80.

Lo más interesante que ofrece este método es la posibilidad de generar una amplia paleta de sonidos con espectros amplios y unos transitorios de ataque muy poderoso y bien definido; recuérdese que los primeros sintetizadores FM, como el DX7, popularizaron unos sonidos de pianos, campanas y similares muy característicos.

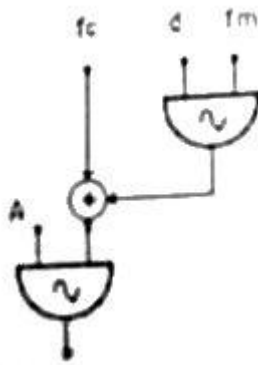
La síntesis por modulación de frecuencia trabaja a partir de un concepto muy sencillo y debe su éxito a la posibilidad de generar un espectro de gran complejidad con solo 2 generadores. En la FM, básicamente, un oscilador (modulador) modula la frecuencia del otro (portador, carrier) estando ambos involucrados dentro del espectro de frecuencias audibles (o superiores), por lo que no se alcanzan a percibir las variaciones de amplitud sino que se escucha un importante cambio en el timbre de la señal modulada. Esto permite, por ejemplo, que con un generador de ondas senoidales (portador) modulado por otro (modulador) se obtengan timbres excepcionalmente ricos en armónicos. El principio de la FM sería como el del vibrato, pero a una velocidad superior a los 20 Hz.

La síntesis FM nace de la teoría por la que es posible alcanzar a programar sonidos naturales mediante una edición electrónica. John M. Chowning en la Universidad de Stanford descubrió que con velocidades por encima de la audición humana y frecuencias con una rapidez similar a las de frecuencias de audio, comienzan a aparecer componentes armónicos proporcionales aproximadamente a la frecuencia portadora del tono que se estaba haciendo vibrar. Se estuvo utilizando en el entorno musical académico mucho tiempo antes de que Yamaha se fijara en el invento y decidiera comercializarlo.

En FM, la frecuencia instantánea de una onda portadora es variada de acuerdo a una onda moduladora, de tal forma que los cambios en la portadora se convierten en la frecuencia de la onda moduladora o frecuencia moduladora. La cantidad de variación en la onda portadora cambia alrededor de un promedio que se conoce como la desviación de picos de frecuencia entre ambas ondas y a la vez es proporcional a la amplitud de la onda moduladora.

En el caso más sencillo, la síntesis FM necesita únicamente dos osciladores: la señal portadora y la señal moduladora. Parte de la idea de que cuando la moduladora no es una señal de baja frecuencia sino que entra ya en el rango de las frecuencias audibles, se crean un gran número de frecuencias adicionales que generan un sonido con un gran contenido armónico.

Los parámetros de la señal modulada en frecuencia son:



- Frecuencia portadora (f_c)
- Frecuencia moduladora (f_m)
- Índice de modulación $I = d / f_m$ (d : amplitud, f_m : frecuencia modulación)
- Bandas laterales (funciones de Bessel): $f_j = f_c \pm j \cdot f_m$
- $j = (0, I+2)$
- $\alpha = 2 \pi f_c$
- $\beta = 2 \pi f_m$

La expresión resultará:

$$A_m = A \sin(\alpha t + I \sin \beta t)$$

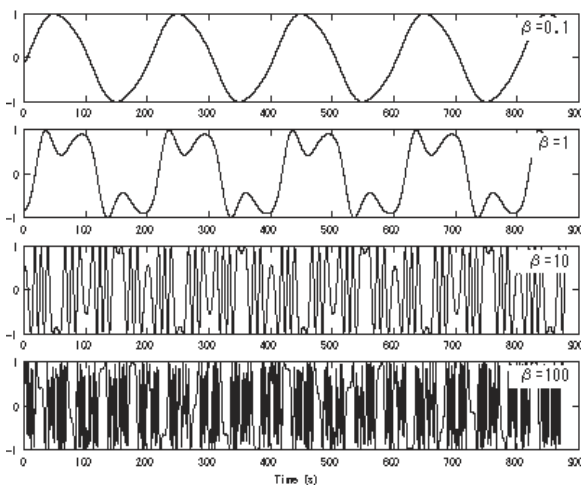
Ejemplo 1:

- Si $f_c = 400$ Hz, $f_m = 50$ Hz, $d = 50$, $I = 1$
- j variará entre 0 y 3 ($I + 2$)
- Aplicando la fórmula $f_j = f_c \pm j \cdot f_m$, Las bandas obtenidas serán:

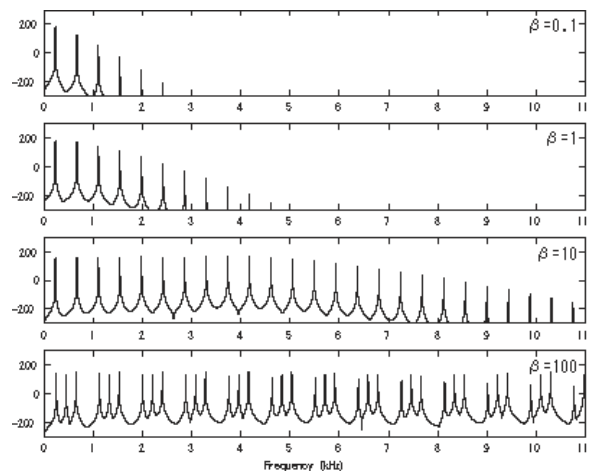
$400-(3 \times 50)$	$400-(2 \times 50)$	$400-(1 \times 50)$	$400-(0 \times 50)$	$400+(1 \times 50)$	$400+2 \times 50$	$400+3 \times 50$
250	300	350	400	450	500	550

El número de frecuencias laterales que ocurren en FM está relacionado al índice de modulación I , de tal forma que al incrementar I de 0 en adelante, una cantidad proporcional a la energía de la portadora es tomada y distribuida a cada una de las bandas o frecuencias laterales. También al incrementarse el valor del índice de modulación, el ancho de banda de la onda resultante es ampliado y se van produciendo bandas laterales.

Ejemplo 2:



Aquí vemos una portadora de 220 Hz modulada por una señal de 44 Hz, con distintos índices de modulación. En el primero $I = 0.1$, en el segundo $I = 1$, en el tercero $I = 10$ y en el cuarto $I = 100$. En el siguiente gráfico vemos su representación en frecuencia.



La síntesis FM es un método simple para lograr sonidos que se desenvuelven en forma natural. El espectro de un sonido generado por síntesis FM puede ser manipulado al cambiar cuidadosamente el índice de modulación, como también la separación entre las frecuencias portadoras y moduladoras. Podría desarrollar un poco más el tema de las funciones de Bessel y las Frecuencias Laterales Reflejadas, pero se escapa de nuestro objetivo.

Al estar experimentando con diferentes tipos y tasas de vibrato y trémolo en la voz, Chowning descubrió que con velocidades por encima de la capacidad humana y frecuencias con una rapidez similar a las de frecuencias de audio, comienzan a aparecer componentes armónicos proporcionales a más o menos la frecuencia portadora del tono que se estaba haciendo vibrar. Esta investigación dio como resultado uno de los métodos de síntesis de sonido en la categoría de manipulación de formas de onda y conocida como síntesis por frecuencia modulada o simplemente síntesis FM.

Es un concepto muy antiguo pero, en lo que a tareas de síntesis sonora se refiere, podemos encontrarla en diferentes formatos. De entrada la mayoría de sintetizadores analógicos, o incluso los híbridos digitales/analógicos, son capaces de realizar síntesis FM básica; sin embargo, dado que la FM se apoya fundamentalmente en relaciones de frecuencia entre los osciladores involucrados en el proceso, resulta fundamental que la estabilidad en la afinación sea muy alta. Por otro lado, la síntesis FM se convierte en una herramienta versátil sólo cuando se cuenta con varios osciladores con envolvente múltiples para controlar su amplitud; esto hace que su implementación analógica precise de un número demasiado elevado de componentes o módulos, lo que lo hace poco rentable.

La **FM analógica** la encontramos en cualquier sintetizador analógico modular o semimodular (Moog I, II, III; ARP 2500 y 2600; EMS VCS3, AKS y Synthi 100; Aries; Serge; Buchla; E-MU; Roland System 100 y 700, etc.), así como en sistemas más cerrados (Minimoog, Micromoog, Multimoog; ARP Odyssey; Kawai 100F; Prophet 5, 600, T8, Pro one, etc.). Uno de los sistemas de FM analógica más logrados y confiables es el de los Oberheim Matrix 6, 12, 1000 y Xpander. En todos los ejemplos de síntesis por FM simple en instrumentos analógicos la implementación es de modulación entre dos o más osciladores o entre osciladores sobre filtros resonantes oscilando.

La solución real y comercialmente viable llegó de la mano de la implementación digital del método, que consiguió Yamaha a través del diseño de unos circuitos integrados que incorporaban todos los elementos necesarios.

En la **FM algorítmica** implementada por Yamaha en la línea DX se utilizan 6 operadores distribuidos en 32 algoritmos o 4 operadores en 8 algoritmos. Cada operador es un conjunto formado por un oscilador (en principio de onda senoidal) y un amplificador controlado por una envolvente. Según el algoritmo los operadores pueden ser moduladores o portadores, permitiendo con esto una gran cantidad de posibilidades de programación por algoritmo. Las diferencias entre los distintos instrumentos de FM algorítmica están dadas por la cantidad de operadores y algoritmos disponibles y las formas de onda que disponen los operadores.

Ejemplos:

- 6 operadores onda senoidal, 32 algoritmos: DX1, 5, 7, TX7, 8, 16 y 802.
- 6 operadores, 45 algoritmos, 16 formas de onda y modulación a partir de una onda sampleada: SY99, 77, TG77.
- 4 operadores, 8 algoritmos, 8 formas de onda: DX11, TX81Z.
- 4 operadores onda senoidal, 8 algoritmos: DX21, 27 y 100.

Por tanto, diferentes variantes:

- Dependiendo del número de osciladores (mínimo, obviamente, dos, aunque la mayoría de sintetizadores comerciales utilizan 4 ó 6).
- Si incorporan o no una envolvente real para cada oscilador (algunos de los chips fabricados por Yamaha para su utilización en productos de otras marcas carecían de ella).
- Las posibilidades de variación en la interconexión de los diferentes osciladores o, como es más conocido, el número de algoritmos y conexiones de modulación y realimentación.

Yamaha utilizó 3 tipos de FM: la de seis operadores utilizada en el famoso DX7, algunas variantes de 4 operadores (los chips de este tipo también se vendieron a otras marcas que fabricaron síntesis FM mucho menos exitosas que los de Yamaha) y la configuración ampliada de 6 operadores (o AFM) utilizada en los sintetizadores SY77, TG77 y SY99.

Ejemplos comerciales y artistas que los emplearon o emplean:

- **NED Synclavier** (1979): Michael Jackson, Stevie Wonder, Laurie Anderson, Frank Zappa, Pat Metheny Group)
- **Yamaha DX7** (1983): El rey de la síntesis de modulación de frecuencia. Utilizado por Rush, Steve Reich, Depeche Mode, Zoot Woman, The Cure, Brian Eno, Howard Jones, Nitzer Ebb, Jens Johansson...
- **Yamaha DX1** (1984): Depeche Mode, Elton John, Brian Eno, Dire Straits, Jean-Michel Jarre, Pet Shop Boys, Tangerine Dream...
- **Yamaha SHS-10** (1988): Uno de los primeros "keytar" de los '80.
- **Yamaha SY-77** (1990): Se añade gran capacidad de memoria y se mejora el DX7. Usado por 808 State, Skinny Puppy, Brian Eno, Europe, Toto, Vangelis, Chick Corea, y Front 242.

- **Síntesis por Reproducción de muestras (Samplers)**

Se trata de un método de síntesis substractiva que los fabricantes han denominado PCM (Pulse Code Modulation), AWM (Advanced Wave Memory), AWM2 (Advanced Wave Memory Version 2), AI, etc. Normalmente, todos estos términos se refieren a lo mismo: una señal de audio (un instrumento acústico registrado por medio de un micrófono, o un instrumento electrónico a través de línea) es muestreado, y el resultado es almacenado en memoria RAM o ROM. Si el equipo es capaz de muestrear y guardar el resultado nos encontramos, obviamente, ante un sampler; si el equipo sólo es capaz de reproducir las muestras (desde RAM, ROM o disco) es un sintetizador basado en muestras. La mayoría de sintetizadores basados en muestras y samplers utilizan la síntesis substractiva para generar sonidos, utilizando como materia prima (es decir, haciendo la función de oscilador) una muestra. De todos modos algunos equipos de este tipo (especialmente samplers) ofrecen unas posibilidades limitadas en cuanto a procesado.

El término PCM designa una técnica de codificación que se utiliza prácticamente en todos los equipos de audio digital. Las denominaciones AWM y AWM2 pertenecen a la jerga de marketing de Yamaha y en realidad se refieren a la reproducción de muestras en formato 16 bits. Korg utiliza la denominación AI síntesis en algunos de sus modelos, lo cual significa que son simplemente un tipo más de sintetizadores basados en la reproducción de muestras.

Los sintetizadores basados en muestras ofrecen, a menudo, la posibilidad de conseguir sonidos muy realistas; sin embargo, el muestreo por sí mismo ofrece, en muchas ocasiones, bastantes menos posibilidades para conseguir una interpretación expresiva que cualquier otro esquema de síntesis, ya que las muestras en sí mismas mantienen un marcado carácter del sonido original.

La síntesis basada en muestras ofrece posibilidades no accesibles en otros métodos de síntesis; sin embargo, no todos los sintetizadores de este tipo contemplan dichas posibilidades. Por ejemplo, la modulación de los parámetros de reproducción de la muestra: transposiciones exageradas de multimuestras, modulación del inicio y longitud del loop de la muestra, etc.

Ejemplos:

Los primeros síntes basados en muestras (samplers) fueron avanzados a su tiempo pero también muy caros.

- **Computer Music Melodian** (1976): Desarrollado en New Jersey, Stevie Wonder fue el primero en utilizarlo en su álbum 'Secret Life of Plants'. Primer sampler comercial.
- **Synclavier** (1975): Sintetizador clásico de síntesis aditiva. Usado por The Cure, New Order, Sting, Stevie Wonder, Michael Jackson, Pink Floyd, Kraftwerk, Depeche Mode, Genesis, The Cars, Soft Cell...
- **Fairlight CMI** (1979): Primer sampler digital polifónico. Usado por: Jean-Michel Jarre, Jan Hammer, Peter Gabriel, Mike Oldfield, Pet Shop Boys, Nick Rhodes de Duran Duran, Stevie Wonder, Annie Lennox, Alan Parsons, David Gilmour, Mark Knopfler, Arthur Baker para Afrika Bambaataa, Brian Eno, U2, David Bowie. En España fue usado por Nacho Cano del grupo Mecano. Éxitos míticos como "Shock The Monkey" y "Sledgehammer" de Peter Gabriel, "Thriller" de Michael Jackson.
- **E-mu Emulator** (1982): Sampler digital con disquettes. Permitían almacenar muestras en un disco de 5 ¼", o bien grabadas por uno mismo, o bien de librerías comerciales. Usado por: New Order, The Residents, Depeche Mode, Deep Purple, Genesis...
- **Audioframe Waveframe** (1985): El primer estudio multipistas (todo en uno) sobre disco duro. Incorpora una mesa de mezclas virtual y un sampler poderoso y flexible. Fácil de usar, ya que se basa en el sistema operativo Windows. Es considerado por muchos como el primer DAW (Digital Audio Workstation) de la historia. Usado por Peter Gabriel, Stevie Wonder...

Antes de estos samplers basados en memorias de ordenador, los músicos usaban los 'Tape Replay keyboards', instrumentos que reproducen cintas analógicas pre-grabadas para producir sonido cuando pulsas una tecla. Ejemplos de este tipo de teclados son el Mellotron, el Chamberlin y el Birotron. Fueron inventados a finales de los años 40 y se emplearon para la música desde mediados de los 60 hasta finales de 70.

Los samplers modernos usan la tecnología digital para procesar las muestras y dar forma a sonidos realmente interesantes. El E-mu SP-1200 vio la luz en 1987 y fue un estándar en percusión hip-hop desde finales de 80 hasta principios de los 90. Más tarde, Akai mejoró los procesos técnicos (crossfade looping, time stretch) que permitieron alargar o acortar las muestras sin afectar al pitch.

Durante los 90 empezaron a aparecer los síntes híbridos que utilizaban samples muy pequeños de los sonidos naturales e instrumentos, junto con la síntesis digital para crear más realismo. Ejemplos son los Korg M1, 01/W y más tarde las series Triton y Trinity, también de Korg, la serie SY de Yamaha y los Kawai K.

Hoy en día, las estaciones de trabajo musicales (music workstations) cuentan normalmente con elementos para el sampling, desde un simple playback hasta completos sistemas de edición. La gran diferencia con respecto a las de antaño es que las workstations actuales también incluyen aplicaciones adicionales como un secuenciador para dar flexibilidad a los compositores.

- **Síntesis por Tabla de Ondas**

Este término se utiliza para denominar dos conceptos totalmente diferentes; algunos fabricantes de tarjetas de sonido para ordenador utilizan esta denominación para describir las posibilidades de reproducción de muestras almacenadas en memoria, ya que estas muestras se encuentran almacenadas en la memoria ROM en forma de una tabla.

Sin embargo, en los sintetizadores PPG Wave y Waldorf Microwave y Wave, este término se utilizó para describir la habilidad de producir un sonido realizando una secuencia a través de una tabla que contiene diferentes formas de onda; esta secuencia se realizaba durante el tiempo de duración de una nota, es decir, se utilizaba para producir un sonido, y no un patrón más o menos rítmico. Esta técnica fue desarrollada por Wolfgang Palm de PPG a finales de los 70, y desde entonces se ha usado en otros síntes construidos por Sequential Circuits, Ensoniq, Yamaha, Korg y Waldorf Music. Las formas de onda se almacenan en memorias ROM, aunque también es habitual disponer de una cierta cantidad de memoria RAM donde el usuario podrá cargar también sus propias formas de onda.

Una vez seleccionada la tabla de ondas, esta puede ser controlada por una envolvente, LFO o cualquier otra fuente de modulación en tiempo real. Normalmente, estos sintetizadores también son capaces de interpolar las diversas formas de onda que componen la tabla, de forma que se suavicen las transiciones entre ellas, consiguiendo así sonidos complejos, pero con cambios tímbricos suaves.

Las formas de onda suelen ser simplemente de un ciclo, por lo que la emulación realista de sonidos acústicos suele estar fuera del alcance de este tipo de sintetizadores; siempre es mucho más fácil conseguirlo con un sintetizador que se base en la reproducción de muestras. Pero, a pesar de ello, consiguen sonidos electrónicos con un marcado carácter orgánico, ya que el sonido que entregan suele disfrutar de un gran dinamismo armónico.

Ejemplos comerciales y artistas que los emplearon o emplean:

- **PPG Wave Computer 360** (1978): El inicio de la síntesis por tabla de ondas. Usado por Tangerine Dream, Rush, Depeche Mode, The Fixx, Thomas Dolby...
- **PPG Wave 2** (1981): David Bowie, Jean Michelle Jarre, Stevie Wonder, Mike and the Mechanics, Pet Shop Boys...
- **Ensoniq Mirage** (1984): Sínte más barato pero limitado. Usado por Skinny Puppy, Vangelis, Jimmy Edgar, and Jimmy Jam...

- **Síntesis Lineal Aritmética**

Híbrido entre la síntesis substractiva y el modelado por tablas de onda. Desarrollado por Roland. El D-50 fue el primer teclado en combinar un sínte con formas de onda muestreadas que podían ser modificadas. La síntesis LA ofrecía los sonidos realistas de un sampler con el control y creatividad de un sínte, todo a un precio razonable.

- **Roland D-50** (1987): Fue la respuesta de la marca al éxito sin precedentes del Yamaha DX-7, presentando un concepto revolucionario que cambió para siempre el concepto de lo que sería la síntesis. Con el pomposo nombre de "Síntesis Lineal Aritmética" (L.A. Synthesis), Roland presentaba un sistema basado en muestras PCM + generador de síntesis. Hoy en día, 20 años después, la gran mayoría de dispositivos digitales siguen basados en ese concepto. Lo usaron Jean-Michel Jarre, Limousine, Enya, Dream Theater...
- **Roland MT-32** (1987): Versión barata del D-50. Estándar en música y efectos para videojuegos.

- **Síntesis Vectorial**

El primer sintetizador que implementó este método de síntesis fue el Prophet VS. Sequential Circuits la desarrolló pero al tiempo quebró. Este sintetizador permite mezclar hasta cuatro osciladores, entregando cada uno de ellos diferentes formas de onda, en tiempo real y utilizando un controlador de tipo joystick y generador de envolventes multi etapa. El concepto fue luego usado por Yamaha en los SY22 y TG33, y más tarde por Korg en la Wavestation.

Aunque se trata de un concepto muy simple, resulta muy efectivo y permite un grado de expresividad pasmoso. La síntesis vectorial dota de movimiento a un sonido proporcionando un cross-fader dinámico entre (normalmente) cuatro fuentes (osciladores). Las cuatro fuentes vienen indicadas conceptualmente como A, B, C y D. Su mezcla viene representada por un punto en este plano del vector. El movimiento del punto proporciona sonidos interesantes y es la clave de esta técnica. Se realiza mediante un joystick, aunque este punto también puede ser controlado variando las envolventes o LFOs.

Otros sintetizadores “vectorizados” son los Korg Wavestation y los Yamaha SY22, TG33 y SY35. Los Yamaha pueden mezclar hasta dos elementos FM y dos elementos muestreados, mientras que los Wavestation pueden mezclar hasta cuatro osciladores basados en el secuenciado de formas de onda muestreadas.

Ejemplos comerciales y artistas que los emplearon o emplean:

- **ProphetVS** (1986): Brian Eno, Trent Reznor, Apollo 440, Depeche Mode, Vince Clarke, Kraftwerk, Vangelis, Erasure...
- **Korg M1** (1988): Fue el primer sintetizador que llevó la tan popular síntesis avanzada integrada de Korg y que dio origen a los llamados Workstation. Usado por 808 State, Ken Ishii, Depeche Mode, Fluke, The Cure, The Orb, The KLF, Plastikman, Gary Numan, Robert Miles, Mike Oldfield, Kitaro, Rick Wakeman, Rod Argent, Pet Shop Boys, Vangelis, The Cranberries...
- **Yamaha SY22** (1990): Moby, Skinny Puppy, Scanner...

- **Síntesis de Modelado Físico**

Es el método en el cual la forma de onda del sonido que se genera se calcula usando un modelo matemático, utilizando una serie de ecuaciones y algoritmos para simular físicamente un sonido, normalmente un instrumento musical. Las leyes de física que gobiernan la creación de un sonido, constan de distintos parámetros, alguno de ellos son constantes que describen los materiales físicos y dimensiones de los instrumentos, mientras otros son funciones dependientes del tiempo que describen las interacciones del músico con él (puntear una cuerda, tapar los agujeros de una flauta...)

Por ejemplo, para modelar el sonido de un tambor, habrá una fórmula que describa cómo golpear el parche del tambor que inyecta energía en la membrana bidimensional. Después de eso las propiedades de la membrana (densidad, dureza, etc), el contacto de ésta con el cuerpo cilíndrico del tambor, y las condiciones en sus fronteras (la terminación rígida del cuerpo del tambor), describirían el movimiento de la membrana, y por lo tanto la forma de onda o sonido que el tambor generaría. A todas las características anteriores les corresponde un modelo matemático que las emula, y las interacciones entre ellas son descritas por ecuaciones y algoritmos especiales.

Pasa algo parecido si queremos emular el sonido de un violín, la energía de excitación en este caso es provocada por el frotamiento del arco del violín contra la cuerda, y los factores a tener en cuenta son la anchura del arco, la resonancia de las cuerdas, la transferencia de las vibraciones de la cuerda a través del puente, y finalmente, la resonancia de la caja interna en respuesta a esas vibraciones.

Aunque el modelado físico no fue un concepto nuevo en acústica y síntesis, habiendo sido implementado utilizando distintas aproximaciones finitas de la ecuación de la onda por Hiller y Ruiz en 1971, no fue hasta el desarrollo del algoritmo de Karplus-Strong, cuando se generalizó este método perfeccionándolo y llegando a la eficiente Síntesis de guía de ondas digital de Julius O. Smith. Así, junto con el aumento de la potencia de los DSPs a finales de los 80s, la comercialización de este método fue posible.

La Síntesis Karplus-Strong utiliza un sonido percusivo (tal como una corta ráfaga de ruido o un pulso simple) que excita una unidad de retardo con realimentación. Si la realimentación está ajustada lo suficientemente alta (90-99%), se produce un sonido con decaimiento exponencial y un tono definido. El tiempo de retardo es el que determina el tono producido. Este método de síntesis resulta especialmente útil para emular sonidos de cuerdas pinzadas y otros sonidos armónicos percusivos. Para conseguir un decaimiento más realista, se puede incluir un filtro pasa bajos en el bucle de realimentación, de forma que los armónicos más elevados sean amortiguados de forma más rápida.

El método de síntesis Karplus-Strong es una forma muy simple de modelado físico, y posee una de sus más importantes ventajas: dado que el sonido percusivo actúa como excitador para el bucle de retardo que produce el sonido armónico, es posible cambiar el pinzado / digitación de la cuerda modelada cambiando simplemente el sonido percusivo, así como cambiar la cuerda, alterando los parámetros de la línea de retardo.

Como hicieron en años anteriores con la síntesis FM, Yamaha firmó en 1989 con la Universidad de Stanford, para desarrollar conjuntamente este método. El primer sintetizador fue el Yamaha VL1 en 1994.

En cuanto a síntesis el beneficio del modelado físico es que no se basa en samples estáticos, sino en una emulación en tiempo real de todos los componentes de los instrumentos, tal como sucede en la vida real. Otra de las ventajas es que dado que no depende de samples, los instrumentos virtuales pueden ocupar mucho menos espacio en disco duro, y requerir mucho menos memoria, al coste de ser generalmente más pesados para el CPU.

El modelado físico también puede ser usado para modelar circuitos electrónicos. De esa cuenta se pueden desarrollar plug-ins que modelen el comportamiento de unidades hardware y unidades clásicas. Dichos efectos no se basarían en un algoritmo estático, sino cada componente (capacitores, resistencias, etc) del circuito y su efecto en la señal son emulados por modelado físico.

Ejemplos software:

Tal es el caso de **Pianoteq** de Modartt, que con solo 15 MB de requerimiento de disco duro rivaliza con pianos que ocupan 10 o más veces ese espacio. Otra de las ventajas es que además de emular el sonido del piano, Pianoteq emula las resonancias del cuerpo del piano, las vibraciones de las cuerdas, si la tapa del piano está abierta o cerrada, etc... Todo esto es variable con el tiempo, dando como resultado un sonido más real y natural.

Otro instrumento de modelado físico es **Steam Pipe** (incluido en Reaktor), esta vez aplicado a instrumentos de viento y cuerda golpeada. Utiliza un resonador entonado para crear timbres de vientos y cuerdas increíblemente realistas, además de sonidos híbridos como cuerdas sopladas (por extraño que parezca). Los parámetros pueden alterar la forma del tubo usado para el sonido de viento y la rueda de modulación controla los parámetros de amortiguación para crear efectos naturales de soplido por ejemplo. También existe una unidad de reverb de excelente respuesta que complementa a Steampipe a la perfección. Solo desentona el diseño de la oscura interfaz, donde apenas se distinguen las secciones. Se trata de un instrumento muy expresivo, lleno de presets realistas programados a conciencia y otros más extraños y originales. Sin duda, una de las sorpresas de la librería y uno de los más serios acercamientos al modelado físico que puedes escuchar en un ordenador, algo que da fe de la versatilidad de Reaktor.

Otra utilidad de modelar circuitos electrónicos por medio del modelado físico es recrear sintetizadores analógicos con mayor realismo. Dado que cada componente del circuito y su efecto en la señal es modelado, este tipo de instrumentos virtuales sería más fiel en sonido y comportamiento (pequeñas desafinaciones, auto oscilación del filtro, etc.) a la versión hardware. Tal es el caso de los sintetizadores de la colección **Korg Legacy**.

Ejemplos comerciales hardware y artistas que los emplearon o emplean:

- **Yamaha VL1** (1994): Jean-Michel Jarre.
- **Korg Prophecy** (1995): The Orb, Jan Hammer, Mirwais, Front Line Assembly, Depeche Mode, Orbital, The Prodigy, the Crystal Method, Apollo 440, Radio Head, Yes, the Pet Shop Boys...
- **Korg Z1** (1996): KMFDM, Gary Numan, LTJ Bukem, Orbital...
- **Clavia Nord Modular** (1998): Autechre, BT, The Chemical Brothers, The Crystal Method, Junkie XL, Mouse on Mars, Nine Inch Nails...

Sintes de Modelado Analógico:

- **Clavia Nord Lead** (1995): Fue el primer sintetizador digital que usó la técnica de modelado físico para emular circuitos analógicos. Usado por: The Prodigy, Zoot Woman, Jean Michel Jarre, The Crystal Method, Fatboy Slim, Nine Inch Nails, Depeche Mode, Mouse on Mars, Maroon 5, Dr. Dre, Laurent Garnier, ATB, The Prodigy, Autechre, Fluke, Front Line Assembly, KMFDM, Underworld...
- **Roland JP-8000** (1996): Sintetizador que definió el sonido que luego se llamó música trance. El suave sonido de onda de diente de sierra para los solos de este tipo de sonido. Usado por: the Crystal Method, BT, Orbital, Ken Ishii, Vince Clarke, Goldie, Dave Holmes, Prodigy, Groove Armada, Pet Shop Boys, Depeche Mode, ATB, Überzone, Faithless, Gary Numan, Scooter, Konflikt, William Ørbit, Paul Van Dyk, Groove Armada, Garbage...

- **Síntesis Granular**

La síntesis granular se basa en reproducir de forma secuencial una serie de muestras de muy corta duración (denominadas gránulos), de forma que el conjunto se aprecie no como una secuencia rítmica, sino como un tono continuo.

Este tipo de síntesis fue desarrollada en el entorno académico y el primer sintetizador que alcanzó notoriedad fue el sistema Kyma de Symbolic Sound.

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.

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 usualmente de tipo gaussiana. La figura 1 muestra un grano basado en una onda sinusoidal con una envolvente de tipo gaussiana y la figura 2 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.

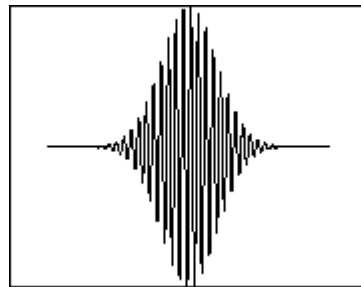


Figura 1: Grano sonoro sinusoidal

Variando la forma de onda, envolvente, duración, posición espacial y densidad de los granos, podemos obtener cantidad de sonidos diferentes. El resultado se puede aplicar a la música, a los efectos de sonido, o a otros materiales secos para procesarlos. El rango de efectos que puede ser producido incluye la modulación por amplitud, time-stretching, desintegración, morphing...

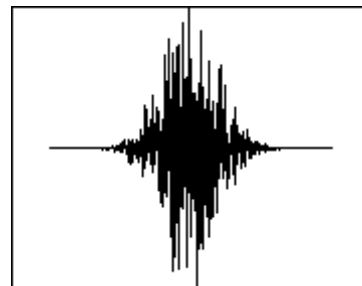


Figura 2: Grano sonoro de ruido blanco

Curtis Roads fue la primera persona en implementar la síntesis granular en el año 2000. Ha desarrollado software como CloudGenerator o PulsarGenerator.

No hay un hardware destacado de este tipo de síntesis. La gran mayoría son aplicaciones software.

- **Modulación en Anillo**

La modulación en anillo no es un método completo de síntesis, sino una técnica de procesado. Algunos fabricantes la incluyen entre los medios para generar sonidos con los que cuenta un sintetizador.

Básicamente, la modulación en anillo es la multiplicación de dos señales; a su salida, el modulador en anillo entregará una señal que será el producto de la suma y diferencia de todos los componentes de frecuencia de ambas señales. Es denominada de modulación 'anillo' porque el circuito análogo de diodos utilizado inicialmente para aplicar esta técnica tomó forma de anillo. Este circuito es similar a un puente rectificador, excepto que en lugar de que los diodos se enfrentan 'izquierda' o 'derecho', van 'en sentido a las agujas del reloj' o 'anti-horario'.

Típicamente, este tipo de procesado consigue buenos sonidos de marcado carácter metálico, así como darle a la voz cierto aire robótico. La primera vez se utilizó en 1963 en la serie de televisión Doctor Who, para poner la voz a los Daleks. También ese mismo año, Don Buchla fue el primero en aplicarlo a la música, incluyendo un modulador en anillo en su primer síntesis modular, el Model 100.

- **Síntesis por Formantes**

Se basa en la teoría acústica de producción de voz, que en su forma más sencilla, dice que es posible ver la voz como el resultado de la excitación de un filtro lineal por una o más fuentes sonoras.

Las fuentes primarias del sonido son tonos, producidos por la vibración de las cuerdas vocales y ruido turbulento causado por una diferencia de presión a través de una constricción, es decir, el ruido producido por la fricción. La fuente de voz usada en los sintetizadores por formantes ha evolucionado desde los trenes de impulsos filtrados o los dientes de sierra de los primeros diseños hasta modelos matemáticos mucho más complejos que permiten tener control sobre parámetros como la frecuencia fundamental, la amplitud, la proporción de tiempo que la glotis está abierta en un periodo, lo abrupto de la forma de onda y diplophonic vibration (los periodos alternos son más similares de los adyacentes), como el desarrollado por Klatt en un sintetizador de formantes.

5. TUTORIAL DE SÍNTESIS CON REAKTOR

- Historia y situación actual

Vamos a diseñar un sintetizador software sustractivo mediante el programa Reaktor de Native Instruments. Junto con Max/msp, Pure Data y Csound, Reaktor encabeza la lista de programas para el diseño y creación de instrumentos y efectos software.

El primer programa que vio la luz fue Max, en 1990. Ya hablábamos de Max Matthews en la introducción a la síntesis digital, pues bien, en honor a él se llama Max. Matthews programó MUSIC en 1957, en los laboratorios Bell, el programa que dio lugar a toda esta serie de descendientes antes nombrados. Fue el primero que generó formas de onda de audio digitales a través de la síntesis. A partir de aquí, comenzaron a mejorarse las versiones de MUSIC, hasta llegar a Max. Csound deriva de estas primeras ramificaciones, y es además el propio lenguaje de programación que se usa para controlar su software.

La versión de Max anterior a la que conocemos actualmente fue originalmente fue escrita por Miller Puckette, quien lo llamo Patcher, un editor para Macintosh en el IRCAM francés (donde Matthews fue Asesor Científico desde 1974 hasta 1980) a mediados de los 80 para que los compositores tuvieran acceso a un sistema de autor de música interactiva hecha con ordenadores. Primero fue usado en una composición de piano y ordenador llamada Plutón, sincronizando el ordenador con el piano.

En 1989, el IRCAM desarrolló y mantuvo una versión concurrente de Max llamada Max/FTS (Faster than Sound, analogía precursora de MSP) y al año siguiente se autorizó la venta del programa a Opcode Systems, quien publicó una versión comercial del programa llamada Max/Opcode (desarrollada por David Zicarelli). Desde 1999, la versión actual de Max es distribuida por la empresa de Zicarelli, Cycling'74 (fundada en 1997).

En 1996, Puckette publicó un software libre completamente rediseñado llamado Pd (Pure Data), el cual contiene varias diferencias fundamentales con el IRCAM original, sin embargo sigue siendo un sustituto interesante para aquellos que no quieran gastar cientos de euros en Max/MSP.

Max tiene numerosas extensiones y encarnaciones; en particular, las extensiones de audio que aparecieron en 1997, trasladadas de Pure Data. Estas fueron llamadas MSP (iniciales de Miller S. Puckette, autor de Max y Pd). Estas adiciones para Max permitieron que el audio digital sea manipulada en tiempo real, y a la vez, permitía a los usuarios la creación de sus propios sintetizadores y efectos.

A partir de aquí surgen el resto de programas. Native Instruments desarrolla Reaktor en 1997, también trabaja por módulos, pero es muy gráfico y sencillo de usar. Además, Reaktor permite ser cargado en cualquier secuenciador de los utilizados hoy en día, como Logic, Cubase o Ableton Live. En cambio, con Max/MSP y Pure Data no es posible aún, hasta dentro de unos meses que se presente la aplicación Max for Live, en torno a finales de 2009, con la cual podremos ejecutar Max/MSP desde Ableton Live.

- **Descripción básica de los elementos de Reaktor**

- **Módulo:** Bloque más básico de Reaktor (en la versión 5 ya incluyen un elemento más básico denominado Core-cell, con el cual diseñar módulos). Algunos de los módulos más básicos son realmente elementales, tan simples como un sumador o multiplicador. Otros son un poco más complejos, como una tabla de eventos que puede ser usada para almacenar información de la secuencia. Algunos módulos generan sonido, como los osciladores y samplers. También se incluyen aquí un gran número de filtros y varios tipos de delays, distorsiones, y demás. No puedes ver la estructura de los módulos, pero sí puedes cambiar sus propiedades a tu gusto.
- **Macro:** Es una encapsulación de módulos u otros macros. No hay límite acerca de cuantos macros puedes tener dentro de otro. Hacen fácil la construcción de instrumentos complejos desde partes 'prefabricadas'.
- **Instrumento:** Es algo que puedes hacer sonar. Algunos ejemplos de instrumentos son sintes, samplers, efectos de delay, secuenciadores, cajas de ritmo, etc. Un instrumento puede contener módulos, macros e incluso instrumentos. Reaktor te permite fácilmente establecer la polifonía de cada instrumento, desde una a 1024 voces! Puedes almacenar snapshots con un instrumento. Un snapshot es un preset o establecimiento de una configuración que te gusta.
- **Ensemble:** El más alto nivel en la estructura de Reaktor. Aquí solo puedes interconectar instrumentos.

Diseño de un Instrumento básico

Nuestro primer sintetizador sustractivo tendrá dos osciladores que podrán ser usados individualmente o mezclados, un oscilador de baja frecuencia, envolvente, filtro paso bajo y osciloscopio.

Oscilador 1

Iniciamos un nuevo ensemble en File / New.

Eliminamos el Master y los dos cables de entrada del instrumento. Simplemente poniéndonos encima, botón derecho / eliminar.

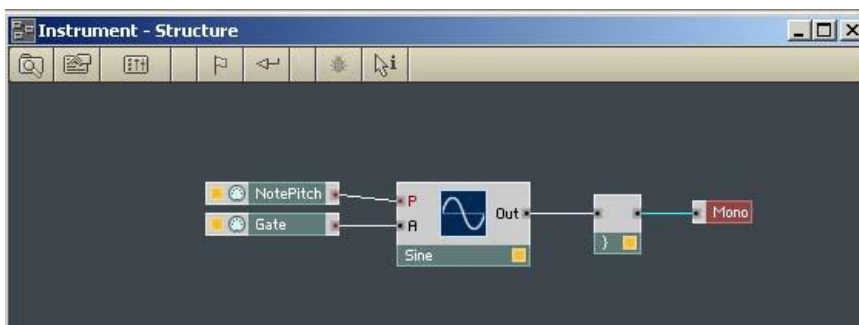
Entramos en la estructura del instrumento con doble click. Eliminamos las dos entradas, y una de las salidas, para trabajar en mono más cómodamente. Renombramos la que nos queda a 'Mono'.

Vamos ahora a introducir nuestro primer oscilador. Built-In Module / Oscillators / Sine.

Conectamos su salida a la nuestra.

El oscilador tiene entradas para Pitch y Amplitud. Usaremos MIDI para controlarlas. Built-In Module / Midi In / Note Pitch. Haremos lo mismo para el Gate, quien nos detectará cuando pulsamos una nota. Si conectamos NotePitch a la entrada P de nuestro oscilador, y Gate a su entrada G, ¡vemos que ya suena!

Tendremos:



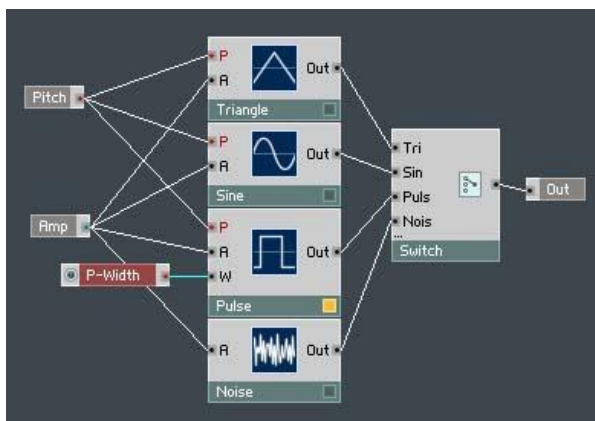
Ahora vamos a crear un macro (que será nuestro oscilador 1) y meteremos dentro este primer generador senoidal básico. Macro / New 2in2out. Nos ponemos encima y con botón derecho entramos en sus propiedades. Le cambiamos el nombre a Oscilador 1. Entramos en su estructura, eliminamos una de las salidas, y la queda la renombramos como Out. Las salidas las llamamos Pitch y Amp (Amplitud).

Salimos a la vista del instrumento y eliminamos los cables de nuestro oscilador senoidal simple y conectamos Notepitch y Gate al Oscilador 1, lo mismo con la salida. Ahora con el botón derecho encima de mi oscilador simple, selecciono Cut, entramos en el Oscilador 1, y pegamos. Conectamos, y ya suena de nuevo.

Vamos a añadir más osciladores simples para enriquecer más nuestro Oscilador 1. Entramos en él, Built-In Module / Oscillator / Pulse, Triangle y Noise. Conectamos Pitch también a Triangle y Pulse (Noise no responde a Pitch) y Amp a los tres. Nos faltará el control de la anchura del pulso. Nos ponemos encima de la entrada W de Pulse y pulsamos Create Control.

Introducimos ahora un conmutador para poder seleccionar la forma de onda que queremos. Built-In Module / Panel / Switch. Cambiamos su número de puertos a 4, en sus propiedades. Y renombramos sus entradas según el oscilador que entre. Vemos lo que tenemos de momento:

Este es nuestro Oscilador 1

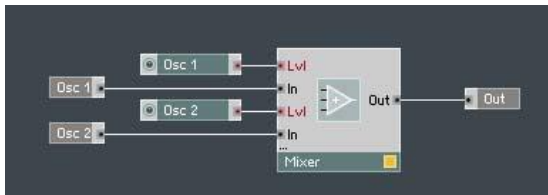
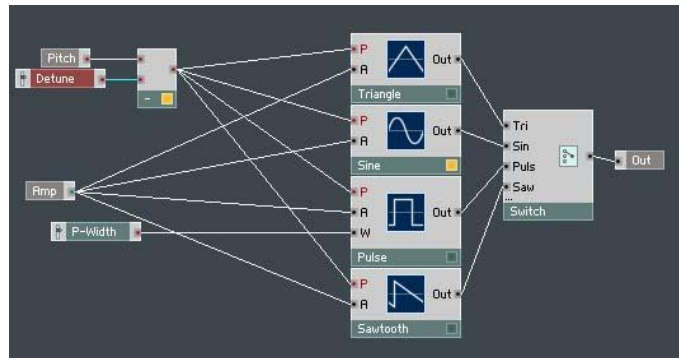


Oscilador 2

Simplemente duplicamos el Oscilador 1, y renombramos la copia como Oscilador 2. Quitamos el Noise e introducimos un Saw. Además, vamos a añadir a este un Detune, con el cual conseguiremos sonidos más ricos. Desactivamos los Pitch, e insertamos un restador. Conectamos a sus entradas Pitch y un Fader que encontramos en Built-In Module / Panel / Fader.

Vamos a modificar un poco los valores del Fader. Le nombramos Detune, cambiamos su tamaño, pinchamos en Value y Hide Scale.

Ya tenemos el Oscilador 2.



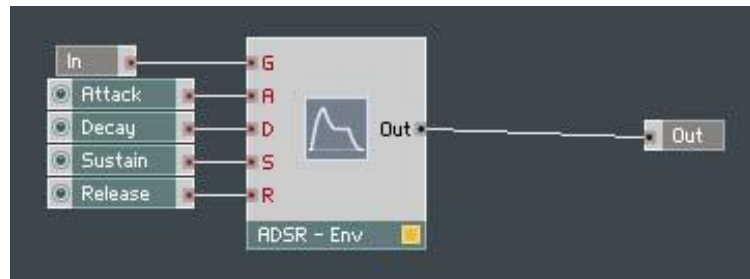
es 2. Hacemos botón derecho sobre los Lvl y pinchamos en Create control, los cuales pueden ser renombrados como Osc 1 y Osc 2.

Salimos de su vista y conectamos el mezclador a la salida de nuestros Osciladores 1 y 2. Por último cambiamos los Faders por Knobs, y listo.

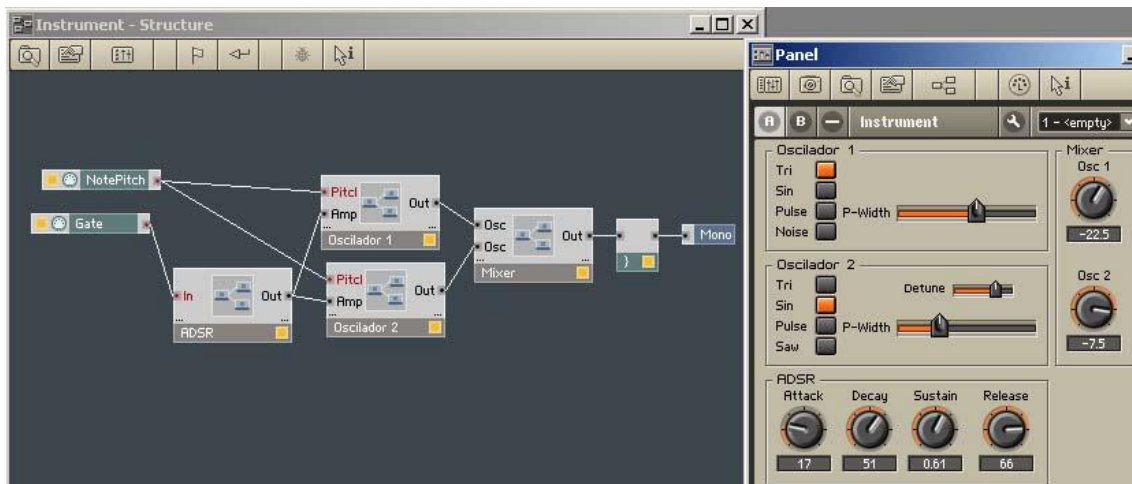
Ahora salimos a la vista de instrumento y crearemos un mezclador para los osciladores. Para que quede más claro lo haremos con un macro. Insertamos Macro / New 2in2out, lo renombramos como Mixer, entramos en su estructura, eliminamos una de las salidas, y las dos entradas las nombramos como Osc 1 y Osc 2. Insertamos un mixer sencillo en Built-In Module / Signal Path / Amp/Mixer y le ponemos que el número de puertos

Envelope

Vamos a añadir un control de envolvente clásico ADSR. Vamos a crear un macro e insertaremos un generador de envolvente dentro. Macro / New linIout. Lo renombramos como ADSR. Entramos en él y Built-In Module / LFO, Envelope / ADSR. Conectamos In a su G y la Out a su salida. En el resto de puerto hacemos Create Control.



Salimos fuera y colocamos nuestro ADSR entre el Gate y los osciladores. Conectando Gate a su entrada, y su salida a los Amp de los osciladores. Ordenando un poco el panel queda:

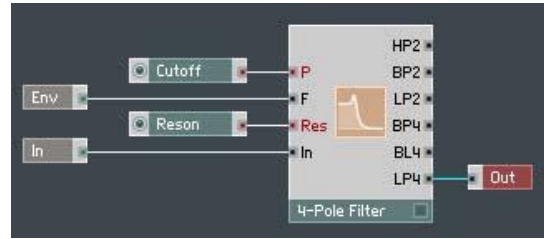


Filter

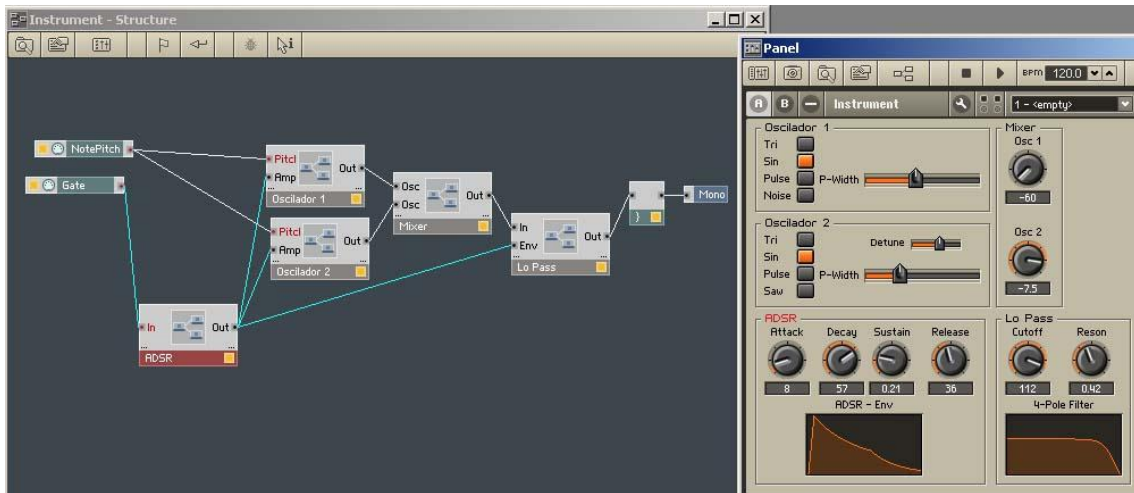
Vamos a insertar un filtro paso bajo. Macro / New 2in2out, y renombramos a Lo Pass Filter.

Entramos en él y eliminamos una de sus salidas, y a la otra la llamamos Out. Renombramos las entradas a In y Env. Insertamos un filtro de 4 polos: Built-In Module / Filter / Multi/LP 4-Pole FM.

Ahora creamos controles para P (Cutoff) y Res (Resonancia). Conectamos In a su entrada (In) y Env a F (entrada de frecuencia lineal). Out irá conectada a LP4. Que es la salida del filtro de paso-bajo de 4 polos. Dependiendo de la salida que cojamos, tendremos la entrada filtrada de una forma u otra. Si sacamos la salida de HP2, actuará como filtro paso alto de 2 polos.



Vamos a situar ahora nuestro filtro justo antes de la salida, después del mezclador. Y sacamos otra salida de nuestra envolvente ADSR a su Env. Arreglamos el panel, y tenemos:



Low Frequency Oscillator

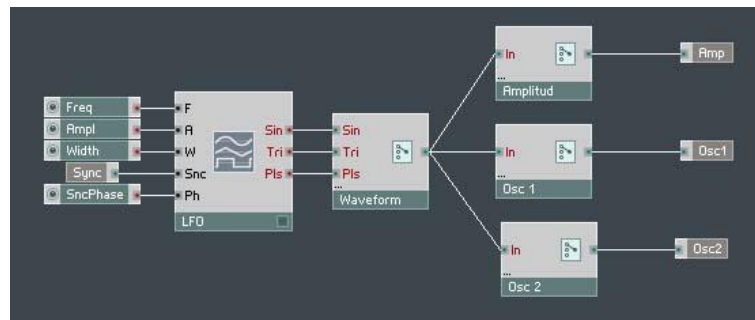
Ahora vamos a añadir un LFO. Partiremos de un macro. Macro / New 2in2out. Lo renombramos a Low Freq Osc. Entramos y borramos una de las entradas y añadimos una salida más (copiar y pegar una de ellas). La entrada llevará la señal de Gate para que el LFO vaya sincronizado con los osciladores, por tanto renombramos nuestra entrada a Sync. Las 3 salidas nos van a permitir dirigir la señal a los pitch de los osciladores 1 y 2 y a la amplitud general. Así que los renombramos como Amp, Osc1 y Osc2.

Insertaremos ahora el LFO en sí. Built-In Module / LFO, Envelope / LFO. Nos proporciona 3 distintos tipos de ondas al mismo tiempo, así que vamos a poner un switch a su salida. Built-In Module / Panel / Switch. Lo renombramos a Waveform y cambiamos el número de puertos a 3. Para aclararnos mejor, renombramos sus entradas como Sin, Tri y Puls. Conectamos cada una a su respectiva salida del LFO.

Necesitamos un sistema para seleccionar a qué queremos aplicar el LFO, si queremos que afecte a uno o a varios de oscilador 1, oscilador 2 o la amplitud general. Así que necesitaremos 3 switches simples y los nombraremos Amplitud, Osc1 y Osc2.

Completaremos el LFO, creando los controles de las entradas que faltan y conectando Sync a Snc.

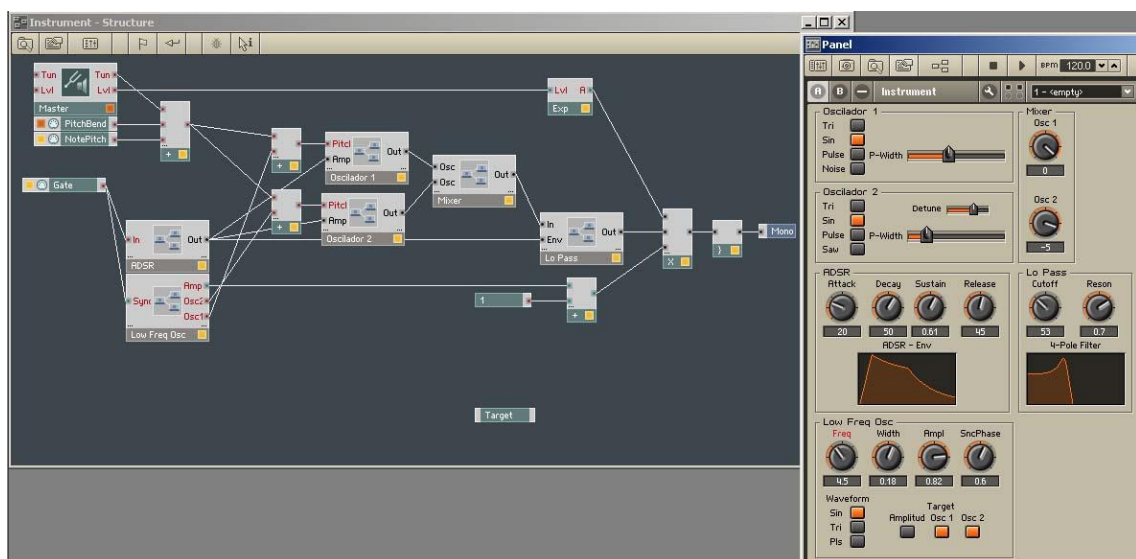
Por tanto nos quedará lo siguiente:



Salimos a la vista de instrumentos y procedemos a conectar nuestro LFO. Lo situaremos junto a nuestro envolvente de amplitud ADSR. Sacaremos una salida más desde Gate y la conectaremos a Sync de nuestro LFO. Vamos a añadir un Pitchbend a Notepitch, por lo que necesitaremos un sumador. Built-In Module / Math / Add. Cambiaremos sus puertos de entrada a 3, en el tercero veremos pronto qué va. Necesitamos añadir la información del pitch del LFO a cada oscilador, sumada a la entrada Pitch de cada oscilador, lógicamente mediante un sumador. Built-In Module / Math / Add. A las entradas de los sumadores van la salida del sumador de Notepitch y Pitchbend, y Osc1 y Osc2 del LFO, cada una a su respectivo oscilador.

Ahora subimos hasta la vista de ensemble, entramos en el master y cortamos el master en sí, lo llevamos a la vista de instrumento y lo pegamos. Entramos en él y eliminamos las entradas. Salimos y conectamos su salida de afinación general (Tun) a la entrada de nos faltaba en el sumador de Pitchbend y Notepitch.

Para la Amplitud será un poco más complejo, tenemos que compensar los niveles que hemos sumado y multiplicado. Para ello creamos un multiplicador y lo situamos antes de la salida. Built-In Module / Math / Multiply, y le ponemos el número de entradas en 3. A una conectaremos el nivel del master, a otra la salida del Lo Pass, lógicamente, y a la otra la salida de amplitud del LFO. Pero antes pondremos dos operadores, una exponencial entre el master y el multiplicador, lo cual haya el nivel logarítmico. Y un sumador entre el multiplicador y el LFO, en cuya otra entrada crearemos la constante 1. Nos queda:



Osciloscopio

Vamos a crear por último una representación de la onda a la salida.

Insertamos un nuevo macro de linlout, eliminamos la salida y en propiedades lo nombramos Wave Designed.

Utilizaremos un macro ya prediseñado que nos muestra la forma de onda que hemos diseñado.



- **Diseño de un Sínte Sustractivo y FM:**

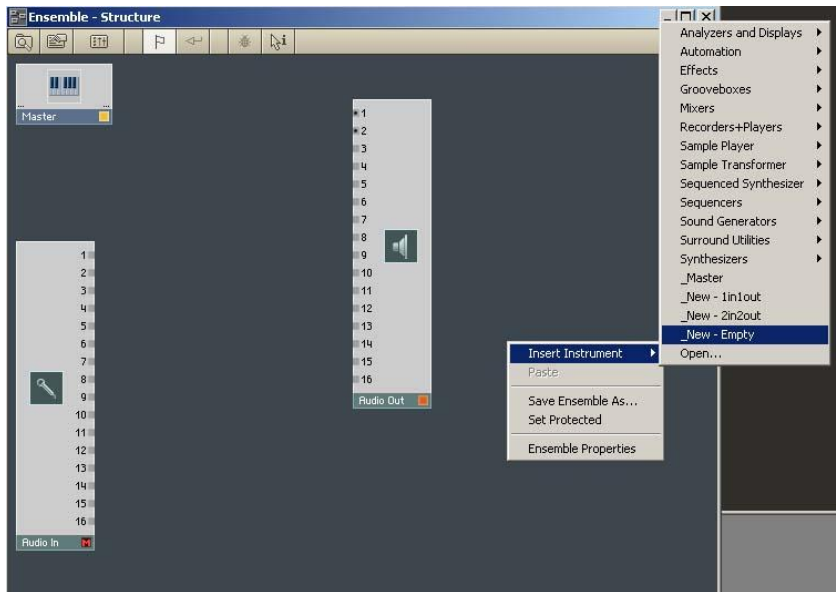
Elaboración de un instrumento que incorpora dos tipos de síntesis, sustractiva y FM. Realización de un estudio en frecuencia del mismo.

Síntesis Sustractiva

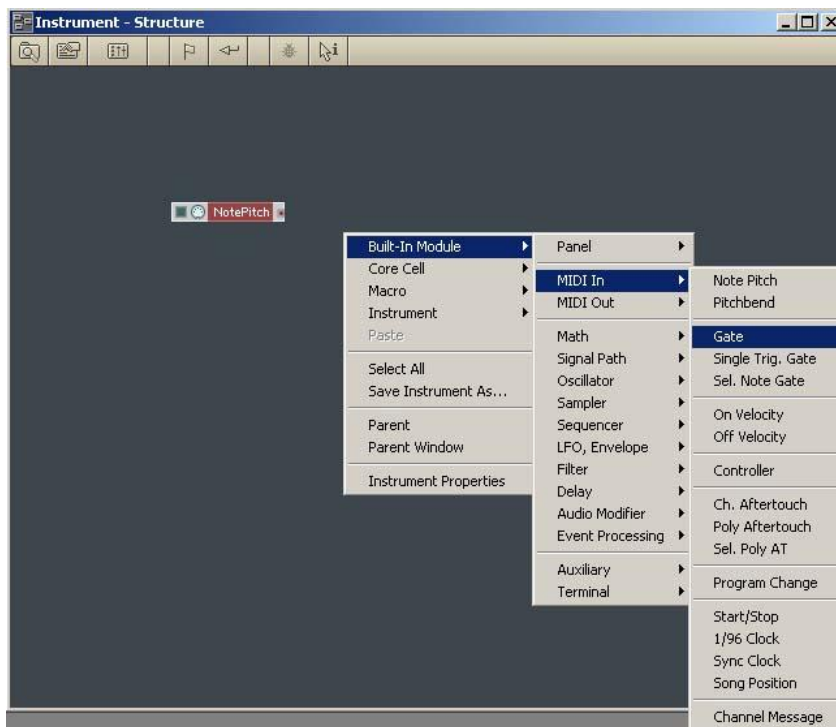
Oscilador 1

Empezaremos por el primer oscilador, que contará con tres formas de onda distintas, control de semitono, ajuste fino, control de FM y de anchura de pulso.

Desde la vista del Ensemble pulsamos botón derecho e insertamos un instrumento vacío.

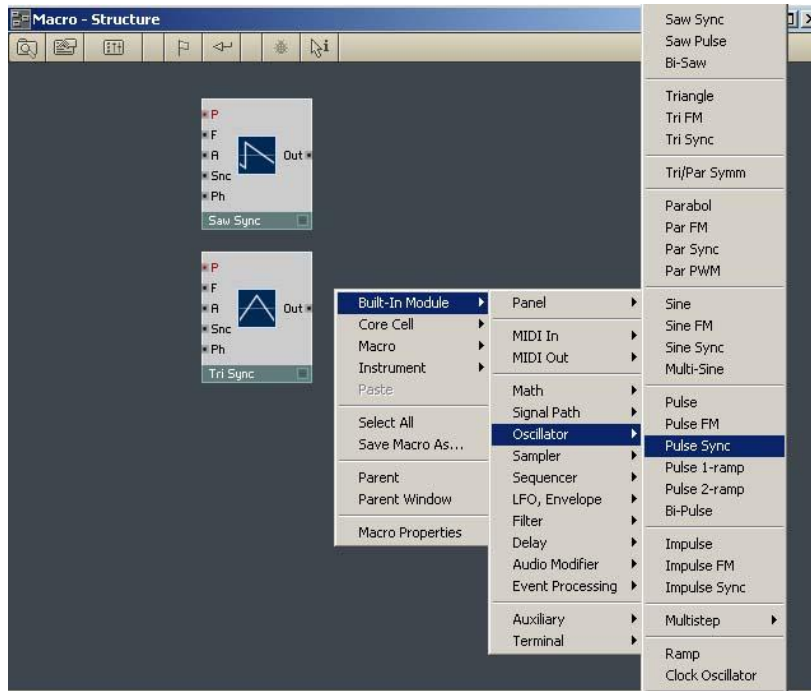


Entramos en el instrumento (oscilador) con doble-click y empezamos a construirlo. Insertamos sus primeros elementos. Botón derecho: Built-in Module / Midi In / NotePitch y Gate. **NotePitch** detecta la entrada Midi cuando pulsamos una nota del teclado y la manda a la entrada P del oscilador para controlar el tono logarítmico. **Gate** es la fuente del evento para eventos Midi Note On y Note Off, e irá conectado a la entrada G del oscilador.



Vamos a por nuestro primer oscilador. Pulsamos botón derecho: Macro / New Empty

Este será nuestro Oscilador 1. Doble click para entrar en él. Aquí insertamos las tres generadores de onda: Built-In Module / Oscillators / Saw Sync, Tri Sync y Pulse Sync.

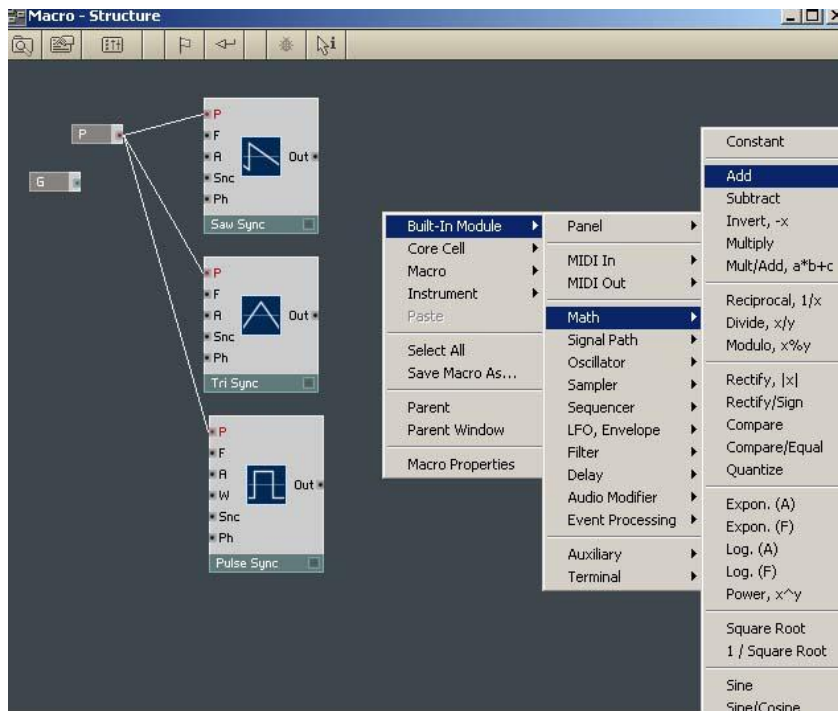


Creamos ahora las **entradas P y G** de nuestro Oscilador 1.

Built-In Module / Terminal / In Port. Creamos dos, y los nombramos como P y G.

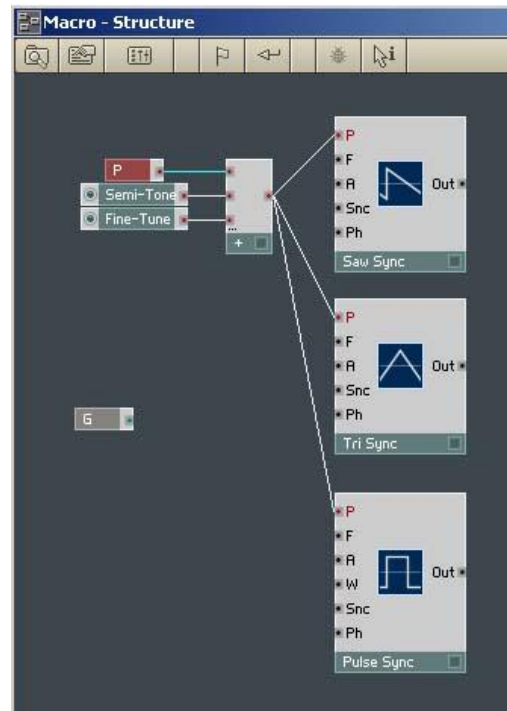
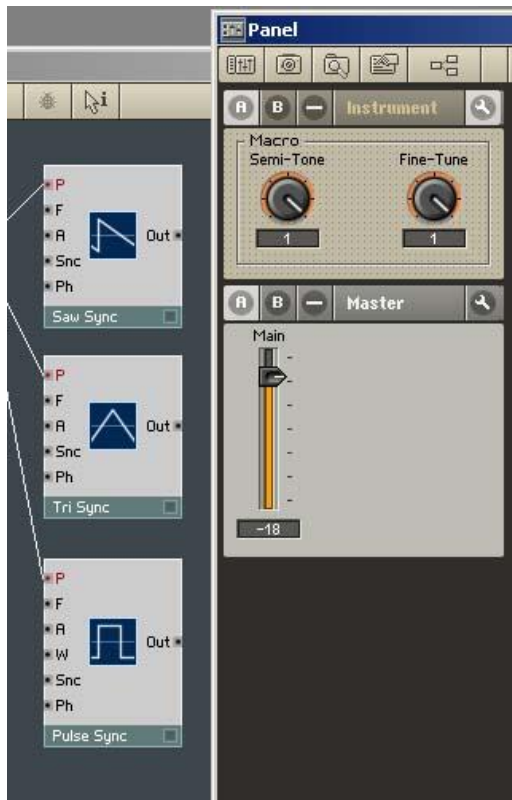
Para nombrarlos, nos situamos encima, botón derecho y Properties. En la casilla Label, tecleamos P y G, respectivamente.

Introducimos ahora el Semi-Tone y Fine-Tune, ya que el tono vendrá controlado por las entradas Midi (P y G) y Semi-Tone y Fine-Tune. Botón derecho: Built-In Module / Math / Add (insertamos dos).



Como queremos sumar 3 cosas en este sumador, entramos en sus propiedades, y en 'min num port groups' ponemos 3. Y conectamos nuestra entrada P a una de sus entradas, y su salida a la entrada P de cada uno de los osciladores. Nos situamos encima de las otras dos entradas, pulsamos el botón derecho, y seleccionamos Create Control. Llamaremos a una Semi-Tone y a otra Fine-Tune.

En la vista Panel podemos ir ordenando los elementos insertados. Pulsando sobre la llave desbloqueamos y ordenamos.

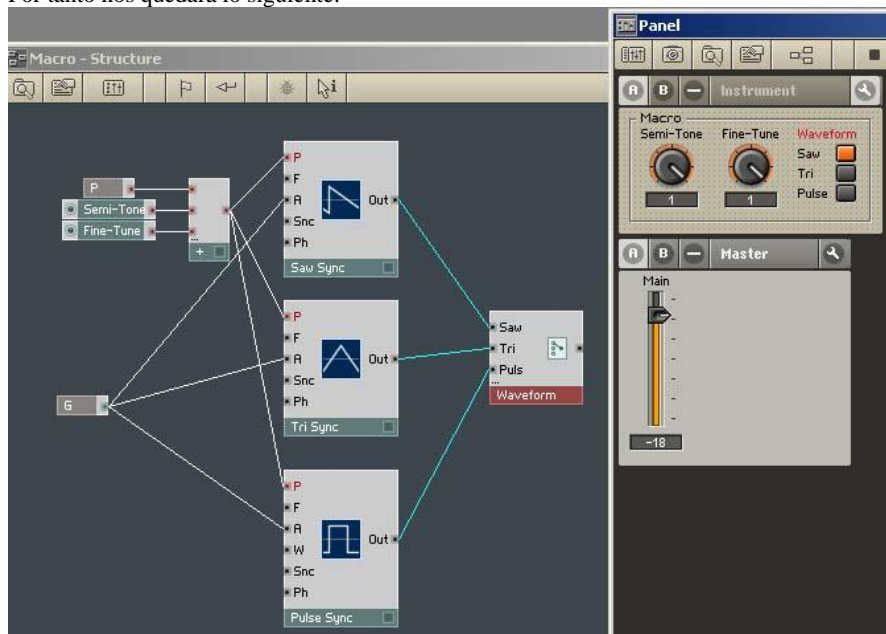


A continuación, conectamos G a las entradas A de los osciladores. Esto controlará la amplitud de la onda. G controla la fuerza con la que pulsemos.

Ahora vamos a crear un conmutador para seleccionar uno de los 3 osciladores. Botón derecho: Built-In Module / Panel / Switch. Entramos en sus propiedades con doble-click y ponemos 'min num port groups' a 3.

Renombramos el Switch a Waveform, y a las entradas las llamamos Saw, Tri y Pulse. Así, conectaremos las salidas de los osciladores, cada una a su correspondiente entrada del switch.

Por tanto nos quedará lo siguiente:



Vamos a crear ahora el puerto de salida en la ventana de Ensemble. Botón derecho: Built-In Module / Terminal / Out Port. Y conectamos a este la salida del switch (selector de Waveform).

A continuación crearemos un controlador de la anchura de los pulsos de dicho oscilador. Muy fácil, botón derecho sobre su entrada W, y Create Control.

Ahora salimos de esta vista con doble-click, y subimos a la vista del instrumento, aquí conectamos NotePitch a nuestra entrada P, y Gate a nuestra entrada G. Subimos una vista más y llegamos al ensemble. Aquí conectamos las salidas de nuestro instrumento a las salidas 1 y 2. Tocamos cualquier nota del teclado... y suena!

Tocamos tres notas al azar con la forma de onda de diente de sierra:



Vamos a establecer el rango de los controladores. Elegimos entre -24 y 24 para el Semitone con step a 1, y PW y finetune de momento los dejamos como están. Por tanto esta es la estructura de nuestro primer oscilador. Vemos que debajo de cada elemento se ilumina un punto amarillo que indica que está bien conectado y le pasa señal.

Así, tenemos un primer oscilador en el cual podemos elegir entre 3 tipos de ondas distintas, y si elegimos los pulsos, podemos también modificar su anchura.

Oscilador 2

Contará con cuatro formas de onda distintas, keyboard track, y sincronización con el Oscilador I.

Para mayor facilidad y rapidez, duplicamos el OSC I (copiar y pegar), y eliminamos el PW dentro de él. En este oscilador no lo necesitaremos.

Este va a contar además con la onda de Noise. La insertamos mediante Built-In Module / Oscillator / Noise.

Deberemos cambiar el número de entradas del Switch a cuatro, para conectar aquí nuestro Noise. A su entrada, nuestra entrada general G.

A continuación vamos a insertar el Keyboard Track o seguimiento de teclado. Cambia los controles si se toca o no el teclado. Así, con Kbd Trk ON, si presionamos D5 oímos D5. Con Kbd Trk OFF presionamos D5 y oímos C4 (por los controles de Semitono y finetune).

El Keyboard Track vendrá implementado como un switch. Eliminamos los cables de P y Semitono e introducimos el switch. Built-In Module / Panel / Switch. Lo nombramos Kbd Track.

Creamos un sumador para P y una constante de -48. Built-In Module / Math / Add. Y lo conectamos a nuestro Kbd Track. De aquí irá a nuestro multiplicador.

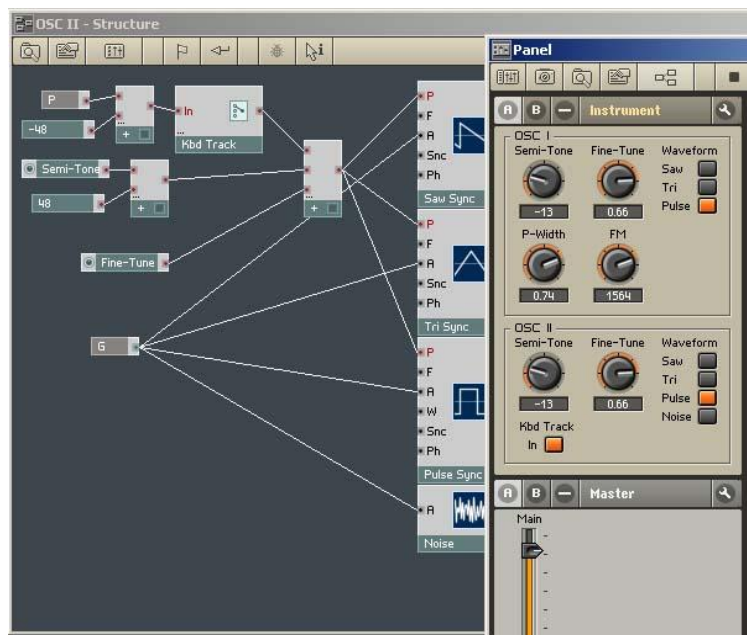
Creamos otro sumador para Semitono y una constante de 48. Lo conectamos a la entrada restante del multiplicador.

Nos quedará:

Cuando presionamos una tecla, ambos osciladores empezarán a reproducir una onda, pero lo harán con distinta fase. Esto producirá sonidos disonantes. Así que vamos a añadir un switch para decidir si queremos sincronizar, o no.

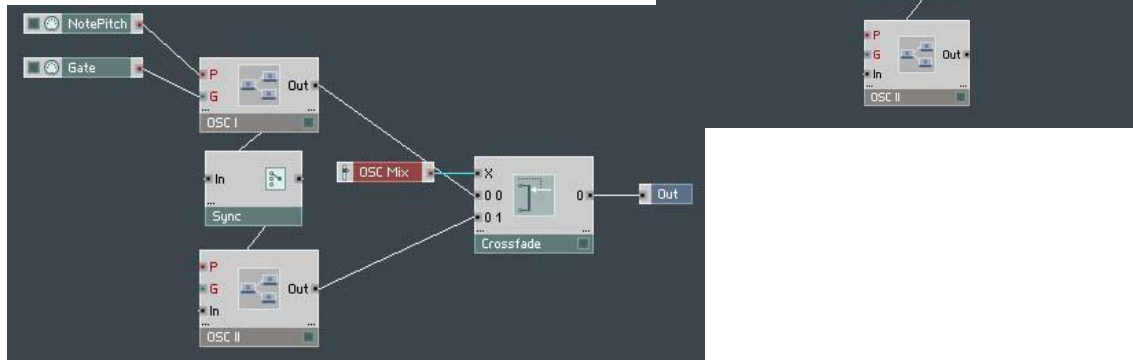
Insertamos un puerto In (lo nombramos Snc) y lo conectamos a las entradas Snc de los tres osciladores.

Vamos a la vista del instrumento. Creamos un switch y lo llamamos Sync. Conectamos la salida del OSC I a la entrada de Sync, y la salida de Sync a la entrada de OSC II.

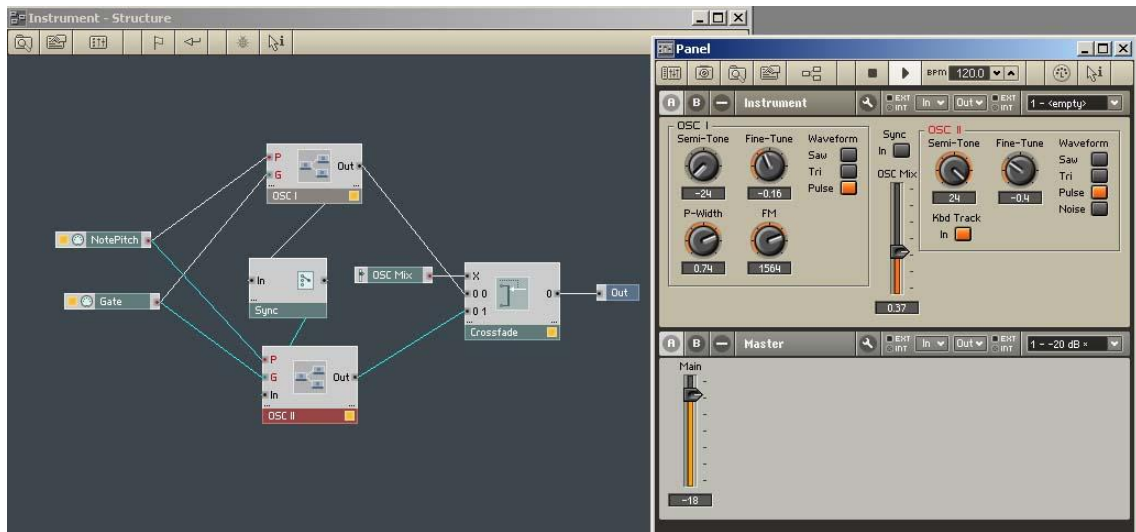


La vista de instrumento será la siguiente:

Ahora podríamos hacer un crossfader para mezclar ambos osciladores como queramos. Lo encontramos en Built-In Module / Signal Path / Crossfader. Conectamos un oscilador a la entrada 00 y el segundo a la 01. En la entrada X creamos un control y lo denominamos OSC Mix.



No nos olvidemos de conectar NotePitch y Gate a las entradas P y G del segundo oscilador. Ahora ordenamos un poco el gráfico del panel y tenemos:



Volvemos a tocar las mismas tres notas, ahora añadiendo en el oscilador 2 una onda triangular:



Ahora vamos a ver la diferencia entre sincronizar o no nuestros osciladores:
En el primer oscilador reproducimos una Saw, y en el segundo un Pulso, y NO sincronizamos:

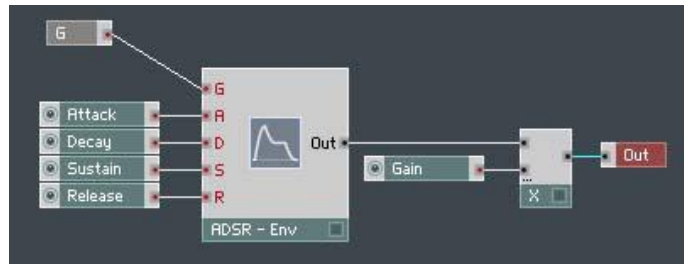


Ahora SÍ sincronizamos:



Amplificación

Pasemos a la etapa de amplificación. Vamos a crear un amplificador en la vista de instrumento: Macro / New Empty. Lo llamamos Ampli y entramos en él. Creamos un filtro para la envolvente en Built-In Module / LFO&Envelopes / ADSR. Insertamos la entrada G y la salida Out. Conectamos la G a la entrada G, y creamos los controles para A, D, S y R. Vemos que automáticamente los crea como Attack, Decay, Sustain y Release.

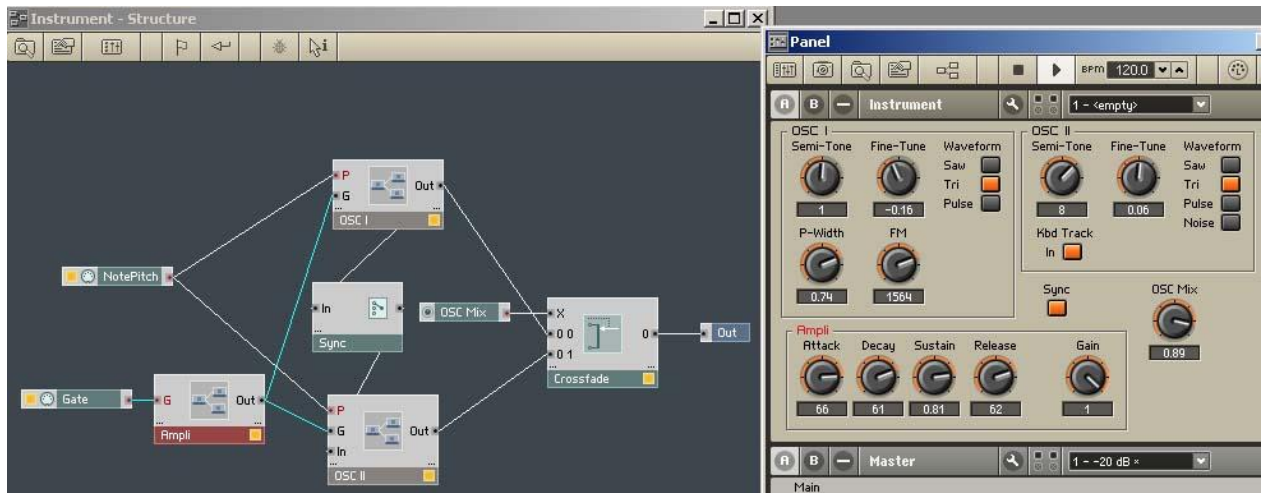


Para la ganancia del amplificador, pondremos un multiplicador a la salida. A una de sus entradas ponemos la salida del ADSR, y a la otra creamos un control (que denominamos Gain). Conectamos el multiplicador a Out. En las propiedades del ADSR, si pinchamos en Visible, veremos cómo cambia la forma de la envolvente mientras modificamos sus parámetros, lo cual es sumamente clarificador.



Subimos a la vista del instrumento y situamos nuestro ADSR. Conectamos Gate a su entrada G y su salida a las G de los osciladores.

Arreglamos la el panel gráfico y nos queda:



Escuchemos ahora distintas pruebas realizadas con el filtro ADSR de nuestro ampli:

Sin ataque:



Con ataque:



Los anteriores audios tenían un Release medio, ahora le recortamos este parámetro:



Y ahora con mucho Release:



Filtro

Creamos un macro nuevo, nos metemos dentro e insertamos 3 terminales de entrada (que denominamos P) y una salida. A continuación insertamos un filtro de 2 polos y otro Ladder en Built-In Module / Filter.

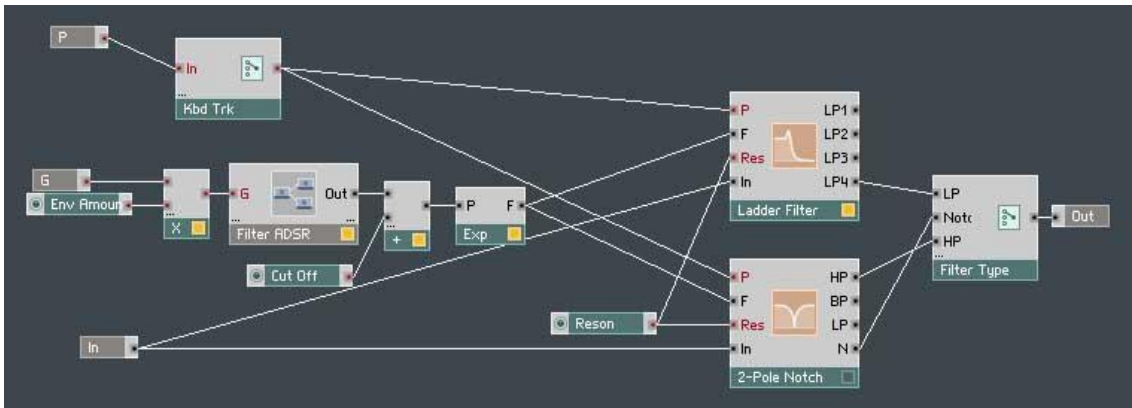
Vamos a poner un switch para seleccionar el tipo de filtro que vamos a usar. Built-In Module / Panel / Switch. En sus propiedades cambiamos el número de entradas a 3. Y las nombramos como LP, Notch y HP. Conectamos la salida del switch a Out, y a la entrada LP, conectamos la salida LP4 del filtro de Ladder (es el que tiene más caída de dBs por octava en el filtro paso bajo); a la entrada Notch, la salida N del filtro de dos polos, y a la entrada HP, la salida HP del filtro de 2 polos.

A continuación insertaremos otro Keyboard track para la entrada P de los filtros. Insertamos un switch, lo renombramos como Kbd Trk y a su entrada conectamos nuestra P. La salida, como he comentado, irá a la entrada P de ambos filtros. En cuanto a nuestra entrada In, irá conectada a las dos In de ambos filtros.

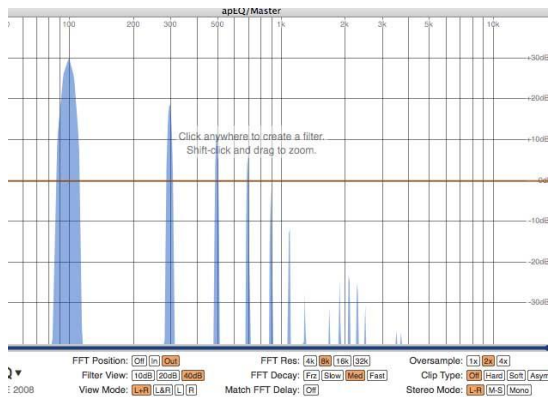
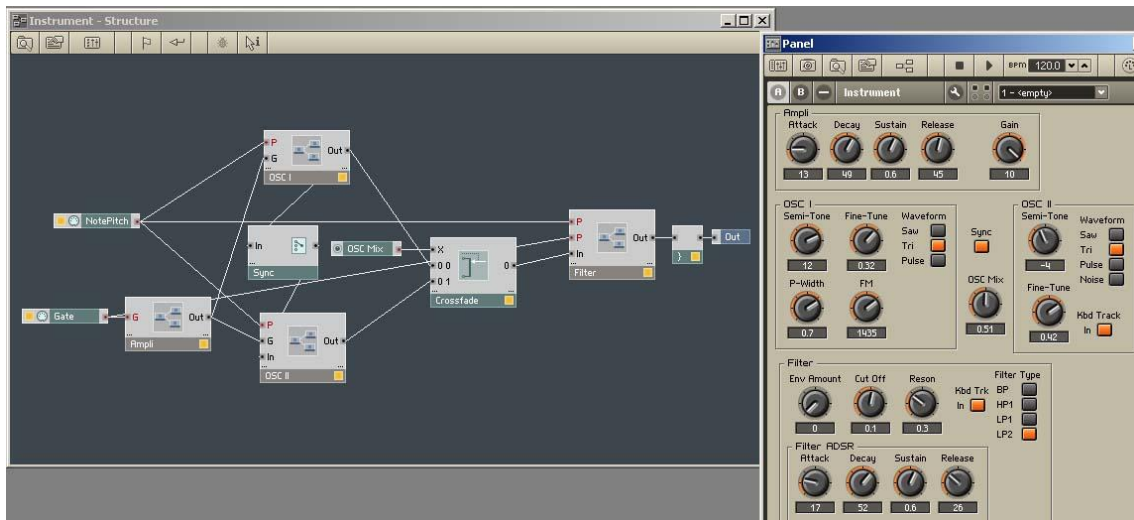
Pasamos a la entrada G. Creamos un nuevo macro, que será la envolvente del filtro. Lo renombramos como Filter ADSR y entramos en él. Insertamos un puerto de entrada y otro de salida, y una envolvente ADSR. Built-In Module / LFO, envelope / ADSR. La entrada la nombramos G y la conectamos a la entrada G de la envolvente, para las demás entradas, creamos controles. Conectamos la salida de ADSR a Out, y ya lo tenemos.

Subimos un nivel y creamos ahora lo que será la cantidad de envío al filtro. Creamos un knob, lo llamamos Env Amount, insertamos un multiplicador, y conectamos a este la G y Env Amount. La salida del multiplicador, a ADSR.

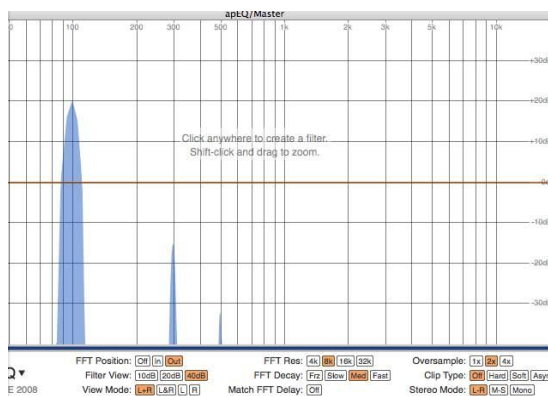
Ahora vamos a crear el Cut off. Simplemente añadiremos un sumador, a una de sus entradas pondremos el ADSR, y la otra crearemos un control, y le llamaremos Cut off (lo pongo valores de 0 a 100). Nos falta una exponencial para que convertir a escala logarítmica. Built-In Module / Math / Exp. A su entrada ponemos el multiplicador, y su salida a las F de los filtros. Por último creamos controles para la entradas de Resonancia de los filtros, y ya lo tenemos!



Salimos al nivel de instrumento y conectamos el filtro. A la entrada In, la salida del Crossfade, a la G, nuestro Gate, y la P, Notepitch. Por último, a la salida del filtro y justo antes de la salida, introducimos un Audio Voice Combiner, para pasar de polifónico a mono. Y ya lo tenemos:

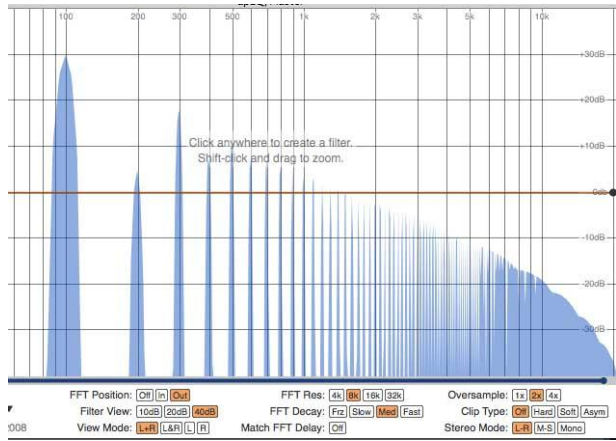


Ahora ya puedo seleccionar (por ejemplo) la forma de onda triangular en mi OSC I, y proceder al filtrado. Eliminando (sustrayendo) así los armónicos que desee para obtener un nuevo sonido.

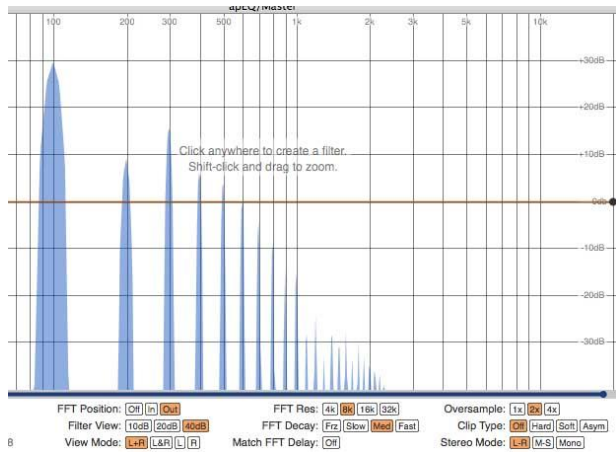


Sin y con filtrado

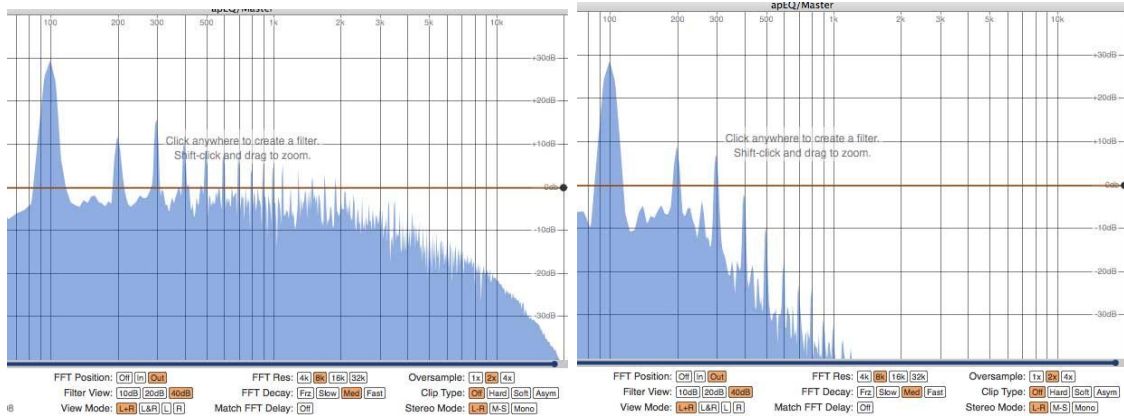
Hemos modificado así la señal original, modificando su espectro en frecuencia. El filtro no crea nuevas componentes espectrales, sólo modifica las existentes en la señal de entrada. Por tanto, cuánto más ricas sean las señales, más y mejor podremos experimentar. Probemos ahora con la señal diente de sierra.



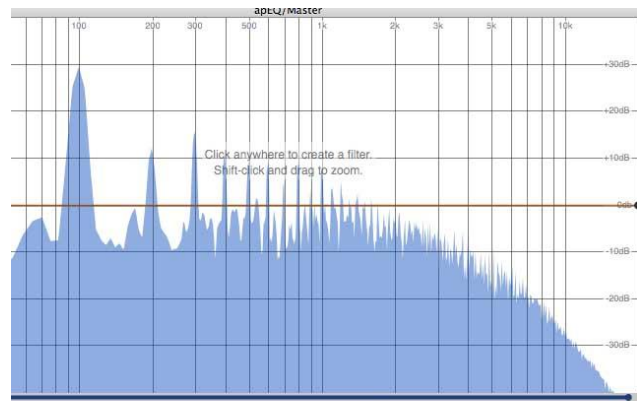
Sin y con filtrado de la SAW



El filtro actúa sobre las componentes espectrales del sonido, realizándolas o atenuándolas en función de su frecuencia. Añadimos Noise desde nuestro oscilador 2, para ver más claramente el efecto del Cutoff.

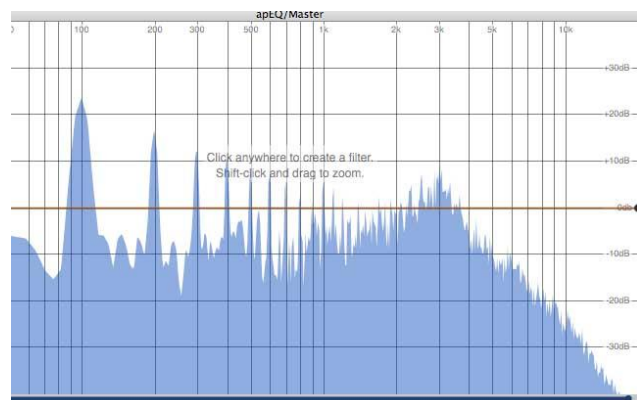


Podemos darle más o menos Resonancia para ver y escuchar este realce:



FFT Position: In Out
Filter View: 10dB 20dB 40dB
View Mode: L+R L&R L R
Match FFT Delay:

FFT Res: 4k 8k 16k 32k
FFT Decay: Frz Slow Med Fast
Oversample: 1x 2x 4x
Clip Type: Off Hard Soft Asym
Stereo Mode: L+R M+S Mono



FFT Position: In Out
Filter View: 10dB 20dB 40dB
View Mode: L+R L&R L R
Match FFT Delay:

FFT Res: 4k 8k 16k 32k
FFT Decay: Frz Slow Med Fast
Oversample: 1x 2x 4x
Clip Type: Off Hard Soft Asym
Stereo Mode: L+R M+S Mono

Osciloscopio

Vamos a crear por último una representación de la onda a la salida.

Insertamos un nuevo macro de lin1out, eliminamos la salida y en propiedades lo nombramos Wave Designed.

Utilizaremos un macro ya prediseñado que nos muestra la forma de onda que hemos diseñado.

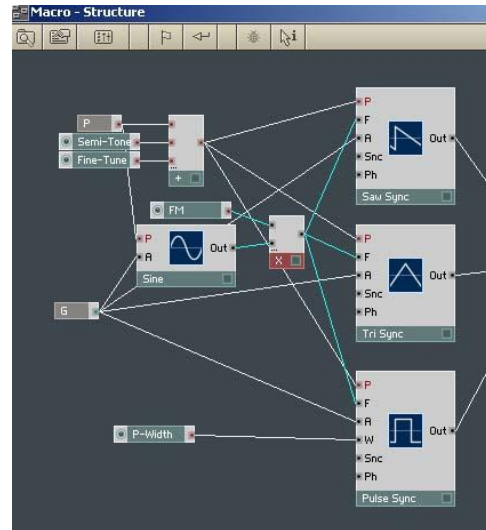


Síntesis FM

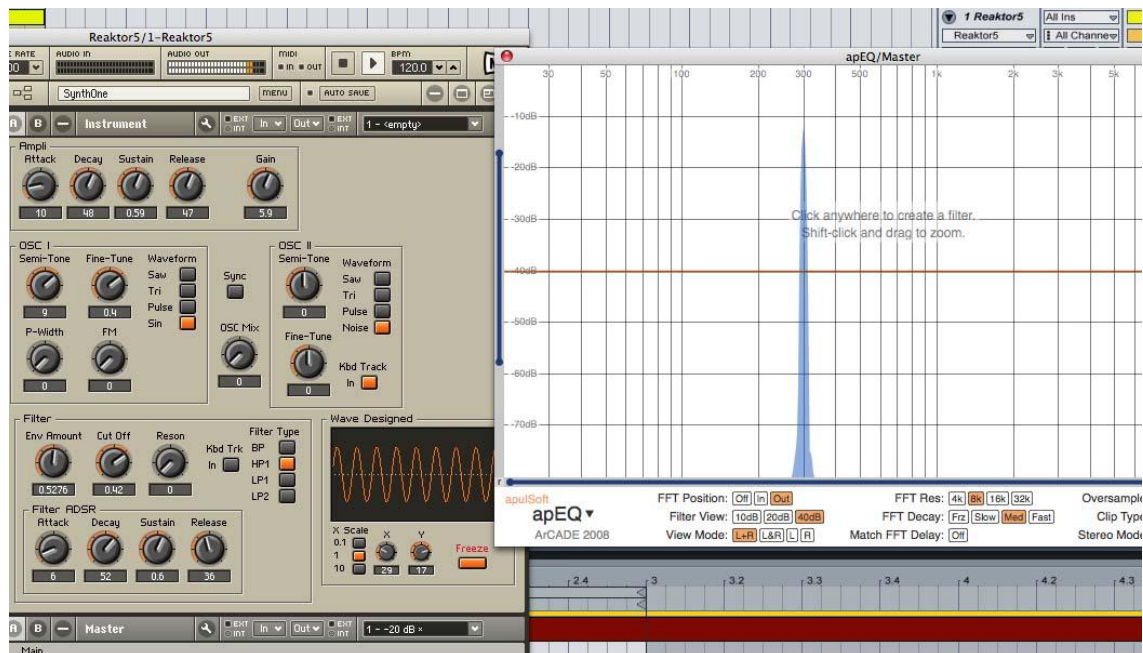
En Reaktor, la Modulación en Frecuencia se realiza mediante los puertos P y F de cada oscilador. Con P seleccionamos la frecuencia de la portadora, y a F conectaremos la señal moduladora. Ambas señales se sumaran y darán como resultado está modulación.

He optado por trabajar desde Ableton Live ya que aquí puedo cargar fácilmente un espectrómetro al master y ver la señal de salida tanto en el tiempo (en la pantalla de Reaktor) como en frecuencia (a través del plugin apEQ de Apulsoft).

Crearemos ahora un control de FM. Primeramente creamos un knob: Built-In Module / Panel / Knob. Lo nombraremos FM. También insertamos un oscilador senoidal simple. Conectamos nuestra entrada P (general) a la entrada P del oscilador simple (actuará como modulador), y la nuestra entrada G (general) a la entrada A. Pero nos surge el siguiente problema: Un rango normal de FM es entre 0 y 5000, pero nuestro oscilador simple solo oscila entre 0 y 1. Solución: Multiplicador. Lo insertamos y conectamos. Multiplicaremos la salida del oscilador y el valor que fijemos en el knob. La salida del multiplicador irá a las entradas F de los tres osciladores. Así, este seno que hemos introducido, nos hace la función de Moduladora, y la señal triangular será la Portadora.



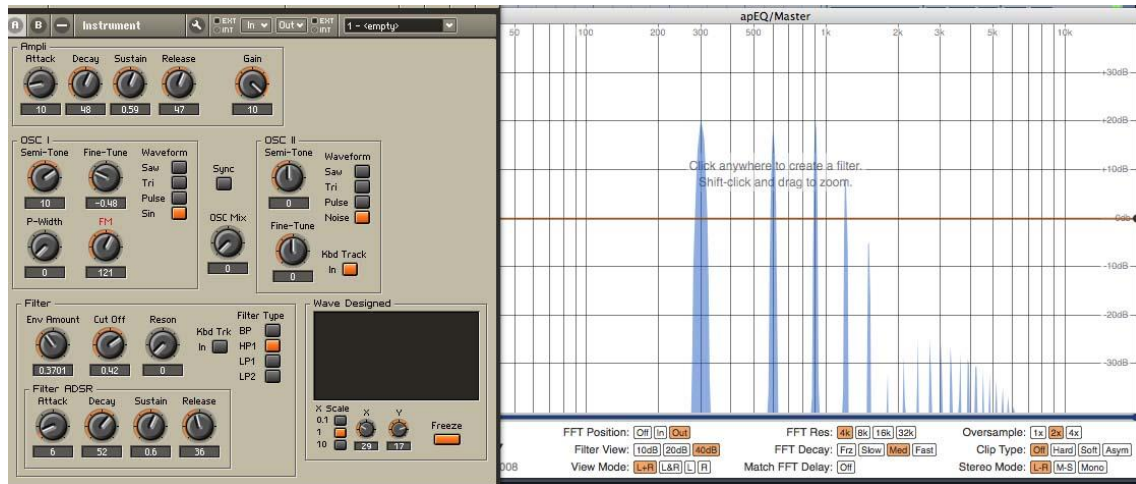
Pero con esta configuración, no podremos generar de ningún modo un tono puro, por tanto vamos a añadir a nuestro OSC I un oscilador simple senoidal. Así podremos generar una onda senoidal pura, de por ejemplo 300 Hz. Vamos a experimentar varias opciones. En primer lugar quiero que la señal de la portadora sea igual que la moduladora, que será la nota que pulsemos. Para ello conecto la salida del sumador de P, Semi-Tone y Fine-Tune, a la entrada P de mi nuevo Sin. Además, coloco OSC Mix todo a la izquierda para trabajar sólo con el OSC I, pulso Sin en mi selector de Waveform y giro el knob de Semi-Tone hasta obtener la representación del tono centrada en 300Hz y este es el resultado:



Más adelante fijaremos los valores de cada Knob. Ahora empezaremos a girar el de FM. Esta señal es un seno que oscilará a la frecuencia que le indiquemos. En nuestro caso, es la misma frecuencia de la señal de la portadora (o nota que pulsemos). Por tanto:

- Frecuencia portadora $f_c = 300 \text{ Hz}$
- Frecuencia moduladora $f_m = 300 \text{ Hz}$

Vemos que a medida que vamos aumentando FM van saliendo tonos en 600Hz, 900Hz, 1200Hz, etc.



Escuchemos lo que obtenemos al girar mi Knob de FM:



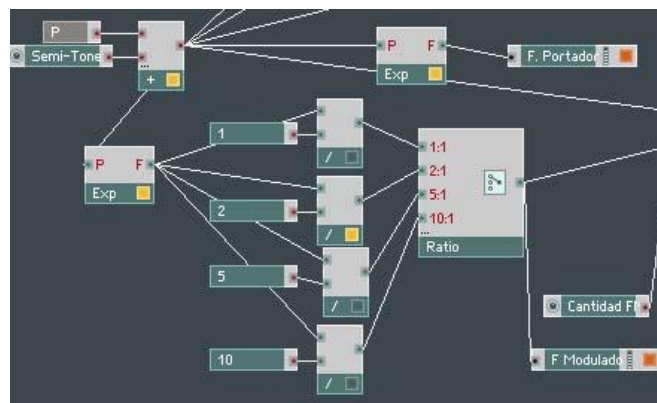
Pero nos faltan parámetros. Nuestra sección de FM necesita mejorar. Vamos a enriquecer nuestro Sinte con un modulador mejor:

Reordenamos la estructura de nuestro sinte bajando todo el bloque modulador. Eliminamos el Sine sencillo que actuaba como modulador, e incorporamos un Sine Sync. Built-In-Module / Oscillator / Sine Sync

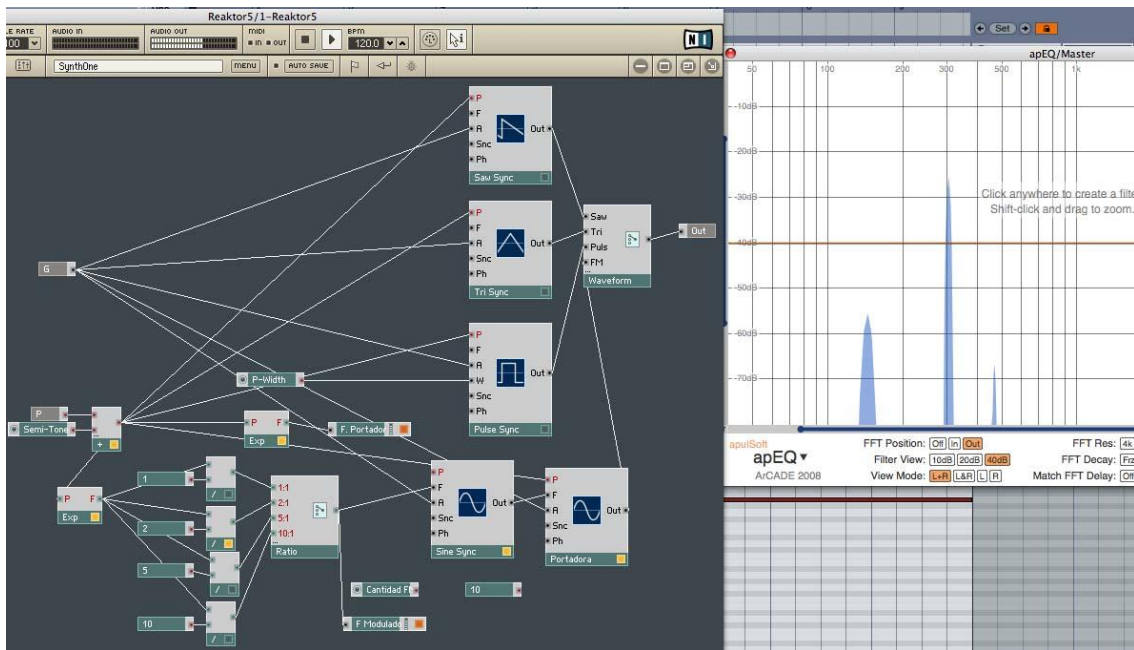
Normalmente los sintes software FM cuentan con 4 operadores, cada uno de ellos con distintos parámetros como pitch, rango, envío a LFO... Nosotros lo vamos a enfocar desde el punto teórico-práctico para el posible alumno vea claramente lo explicado en teoría, pudiendo escuchar al mismo tiempo el resultado.

En la teoría vemos que la frecuencia de la moduladora viene dada por un ratio de la portadora. Por ejemplo, si el ratio es 2:1 y la frecuencia de la portadora es 300Hz, la moduladora será de 150Hz. Vamos a construir 4 divisores para 4 ratios distintos. Y a continuación de ellos, un switch para seleccionar qué ratio quiero.

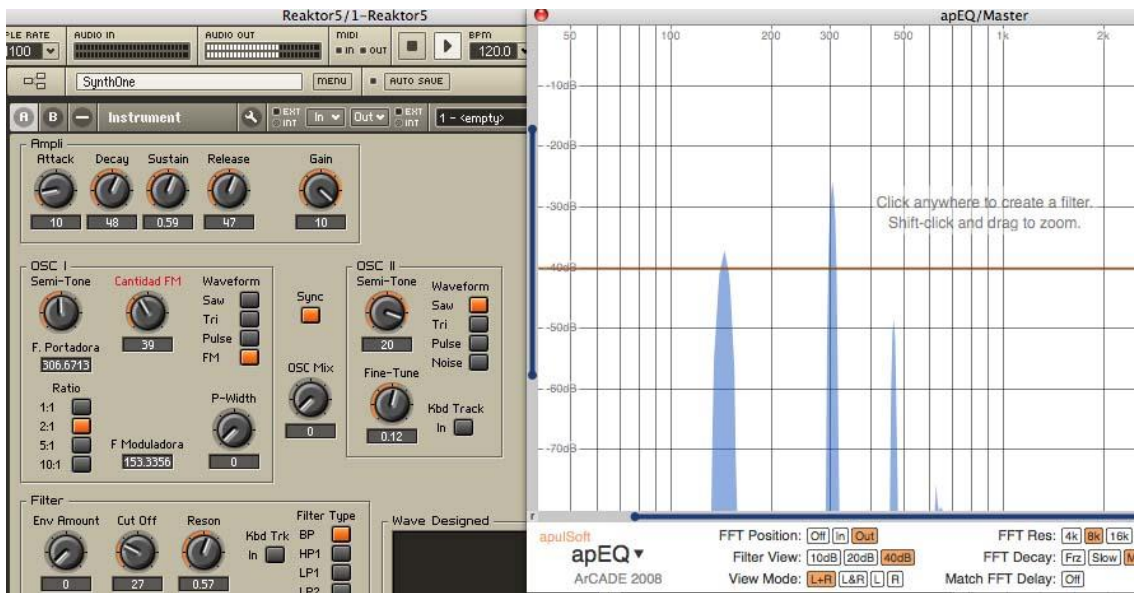
Vemos que además hemos añadido un convertor para pasar los valores logarítmicos de pitch en valores de semitonos (suma de los entradas P y Semi-Tone) a valores de frecuencia lineales en Hz. Además, pongo un display a la salida del sumador de P y Semitone, para saber cual es la frecuencia portadora exacta, ya que es la suma de la nota pulsada y del valor seleccionador con el knob.



Pulsamos un ratio de 2:1 y vemos que me aparecen las dos bandas de la moduladora a izquierda y derecha de la portadora, pero con poca amplitud. Vemos:



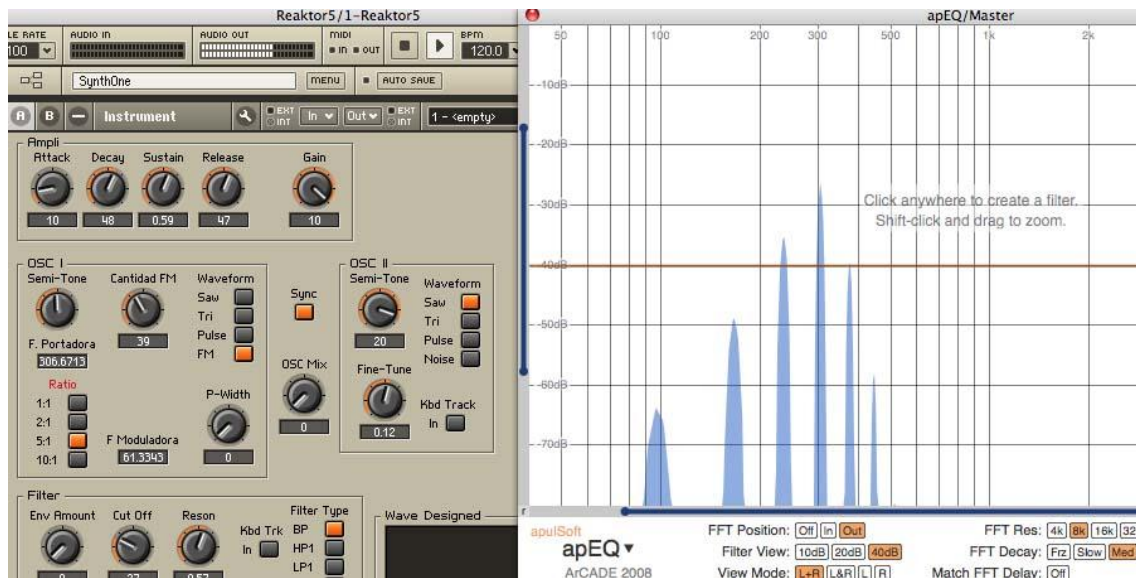
Esto es porque no basta con la amplitud que llega desde la nota que pulsamos. Como podemos ver en la captura, la entrada G general, va a la entrada de amplitud de los dos senos (portadora y moduladora). Por tanto, vamos a introducir un knob que regule esta amplitud, para así además enriquecer nuestro sonido. La llamamos Cantidad de FM y le ponemos un máximo de 100. Ahora vemos las bandas de la moduladora con más amplitud. Además puedo ver que las frecuencias se corresponden con lo que indican los displays.



Esto es lo que escuchamos al poner ratio 2:1 con el Knob de Cantidad de FM a la mitad:



Si Cambio el ratio, obtendré más bandas:

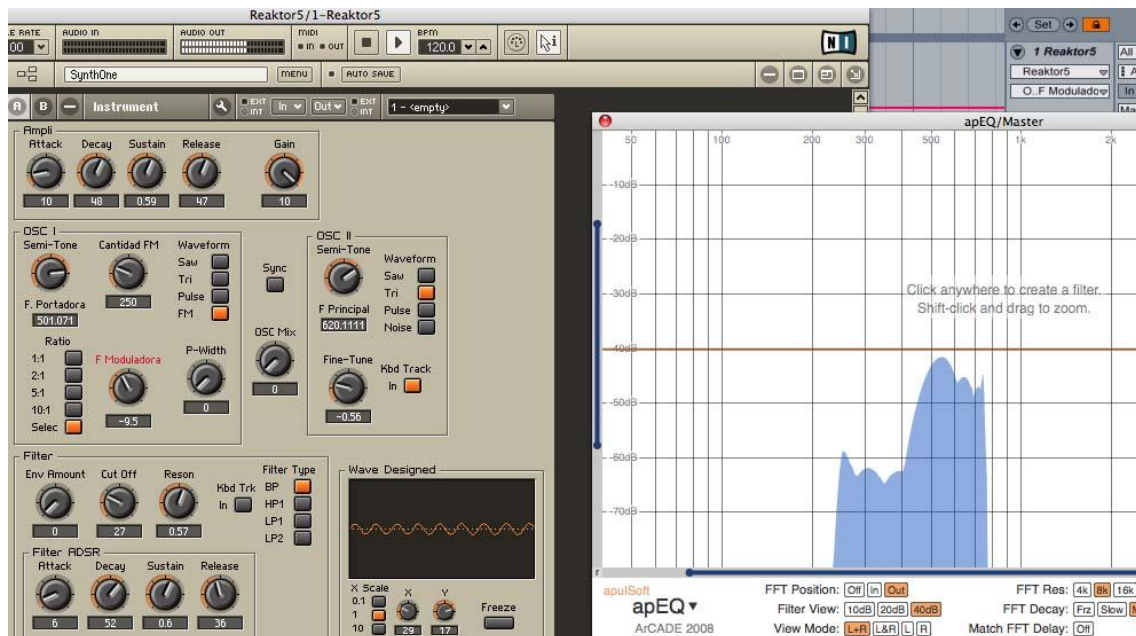


Fijo el knob Cantidad de Fm en torno a 39 o 40 ya que así se puede visualizar bien. Y escuchamos el resultado de ir aumentando el ratio. Empiezo en 1:1, después 2:1, 5:1 y acabo en 10:1



Pero, ¿y si quiero que la frecuencia de la moduladora no sea múltiplo de la portadora?

Vamos a poner una opción más en el switch del ratio llamada Selec, y a esta le vamos a asignar un Knob a través del cual podremos seleccionar nuestra frecuencia moduladora. Le ponemos valores entre -50 y 50 Hz y escuchamos lo obtenido. Son curiosos los resultados a bajas frecuencias y quizás para pequeñas modificaciones resulte diferente. Por ejemplo si asignamos una moduladora de menos de 50 Hz, a una portadora de 500, y vamos bajando de 50 a 0Hz, el efecto de vibración es muy curioso, incluso si llegamos a valores negativos, el sistema se queda oscilando entre 150 y 750 Hz, produciendo un sonido parecido al de una sirena de bomberos. Este es el resultado:



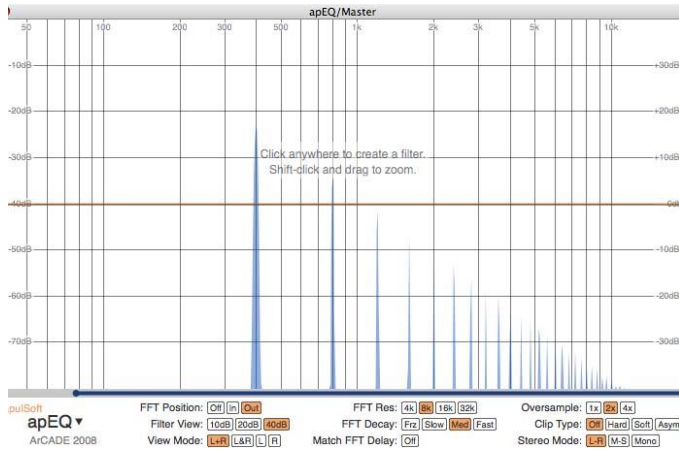
Escuchémoslo:



OSC II

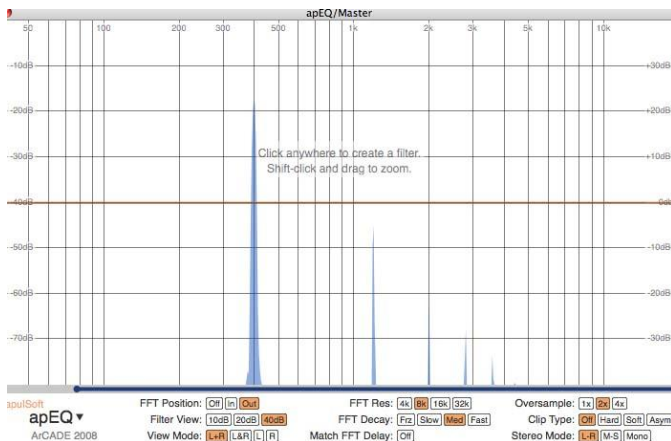
Este segundo oscilador es más sencillo. Cambiando la forma de onda añadiremos más riqueza a lo obtenido en el OSC I. Debemos tener cuidado de no tener pulsado Sync, ya que de esta forma la frecuencia que seleccionemos en el OSC I será la definitiva.

En primer lugar giramos Osc Mix todo a la derecha, a continuación seleccionamos la forma de onda Saw en OSC II. Giramos el control de semitono hasta encontrar los 400 Hz. Si hace falta nos ayudamos de Finetune.



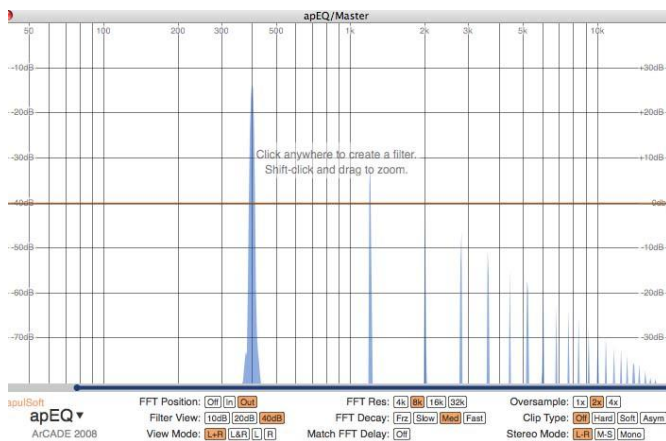
Vemos perfectamente el primero tono en 400 Hz, y los respectivos armónicos del diente de sierra a 800, 1200, 1600, 2K, etc.

Veamos el espectro de los distintos tipos de ondas, seguimos por la triangular:



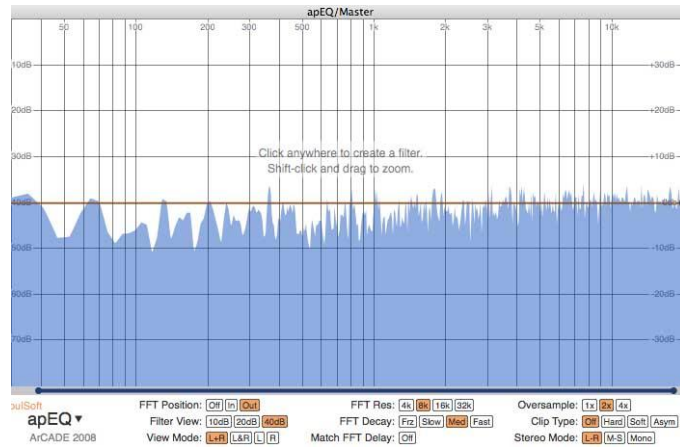
Presenta armónicos en 1200, 2000, 2800 y 3600 Hz.

Ahora vamos a por el Pulso:

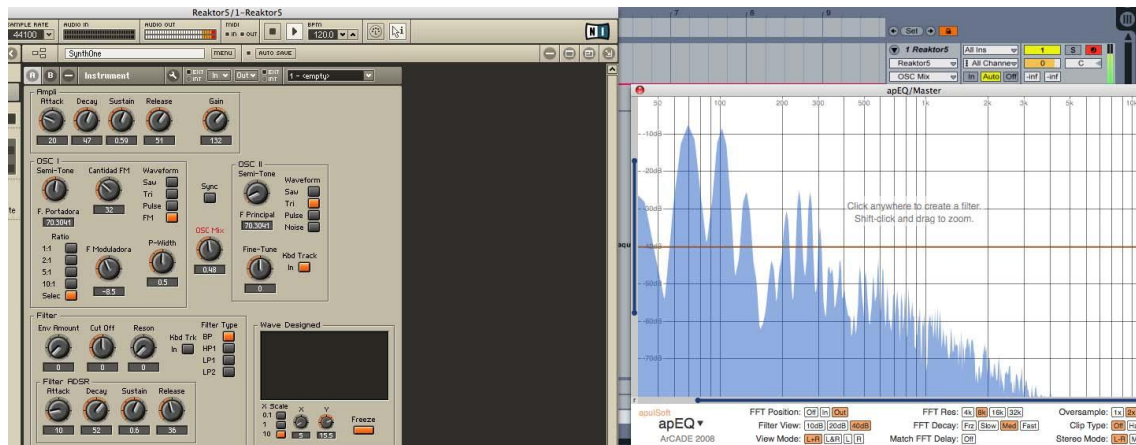


Presenta armónicos en 1200, 2000, 2800... y sucesivamente muchos más que la triangular.

Por supuesto si pulsamos Noise, vemos ruido en todas las bandas.



Vamos a añadir el OSC I. En el OSC I elegimos FM, una portadora de 70 Hz y moduladora de -8.5 Hz. Ponemos el Osc Mix a la mitad, y en el OSC II seleccionamos una triangular, con frecuencia principal también de 70 Hz.



Al tener la moduladora valores negativos, la portadora de 70 Hz baila continuamente entre 40 y 100 Hz, así como el resto de sus armónicos que salen en torno a 205 (bailando entre 110 y 300 Hz), en torno a 340 (bailando entre 180 y 500 Hz), así sucesivamente.

Si aumentamos la portadora a 200 Hz, por ejemplo, ya desaparecen los armónicos pero seguimos teniendo esa oscilación de la portadora, entre aproximadamente 180 y 250 Hz. Conclusión: con valores negativos de la moduladora, la portadora oscila continuamente.

Este es el resultado:

Escuchamos primeramente la señal triangular del oscilador 2, a esta le añadimos este bateo del oscilador 1, y después pulsamos Sync para sincronizar ambas señales.



LFO

Veamos qué ocurre en frecuencia cuando insertamos un LFO en nuestro diseño. Primero vamos a construir un LFO a partir de un macro vacío.

Insertamos un nuevo macro en nuestra vista de instrumento, entramos en él, e insertamos un terminal de entrada, al cual denominamos G. A él le conectamos un switch, que llamaremos también Gate.

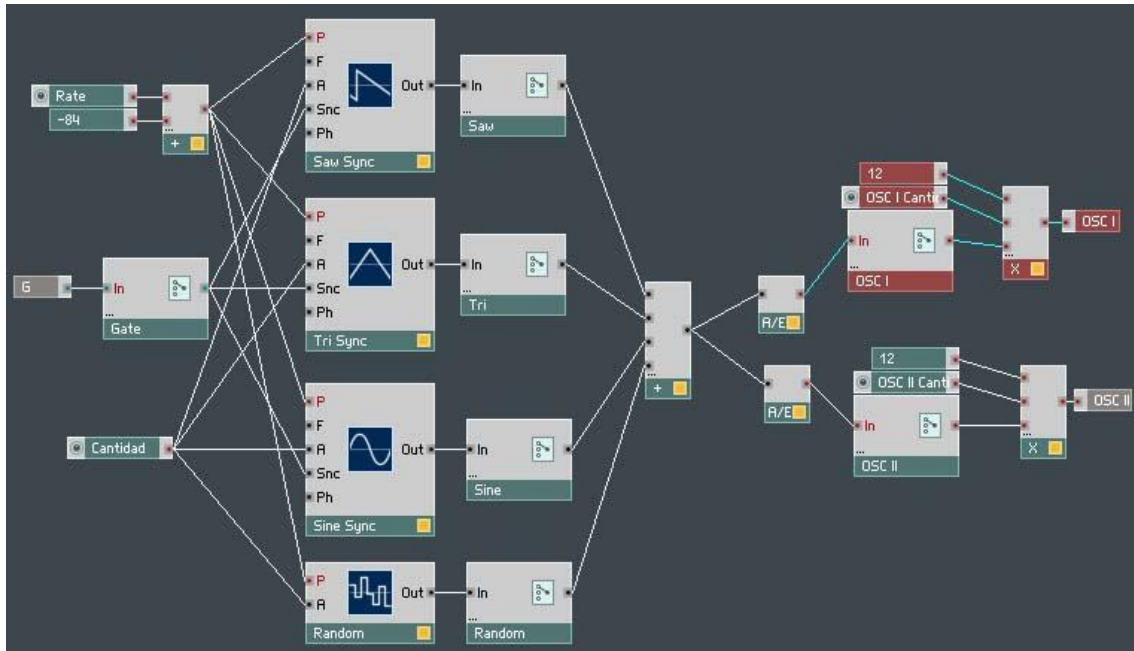
Ahora pondremos cuatro osciladores con las formas de onda: Diente de sierra, Triangular, Seno y Random. Random genera señales aleatoriamente. Produce formas de onda de pasos donde el nivel de cada paso se randomiza en el intervalo interno dado con igual distribución. Funciona como un generador de ruido con distribución uniforme seguida de un circuito de simple&hold sujeto a una frecuencia regular.

Conectamos el switch (Gate) a cada entrada Snc (Sync) de cada oscilador. Y ahora introducimos un sumador al cual conectamos un Knob y una constante de -84. Llamaremos al knob Rate y conectaremos el sumador a las entradas P de los osciladores (entrada que controla la frecuencia). Creamos un knob que llamamos Cantidad y lo conectamos a las entradas A de los osciladores (entrada que controla la amplitud)

Ahora creamos 4 switches y conectamos cada uno a las salidas de cada oscilador. Insertamos un sumador de cuatro entradas y conectamos los switches a él. Creamos dos convertidores de Audio a Evento, y a ellos mandamos el sumador. Creamos 2 switches más, que nombramos OSC I y OSC II, y conectamos a estos los convertidores de A/E. Creamos 2 puertos de salida y los nombramos igual que los switches.

Vamos a añadir un multiplicador para aumentar el valor de OSC I a nuestro antojo. Situamos el multiplicador de 3 entradas entre el switch de OSC I y su salida. A una conectamos el propio switch, y otra una constante de 12 (valor que consideramos adecuado después de varias pruebas) y a la otra un knob, que le llamamos Cantidad. Copiamos este último bloque y lo pegamos igual para OSC II.

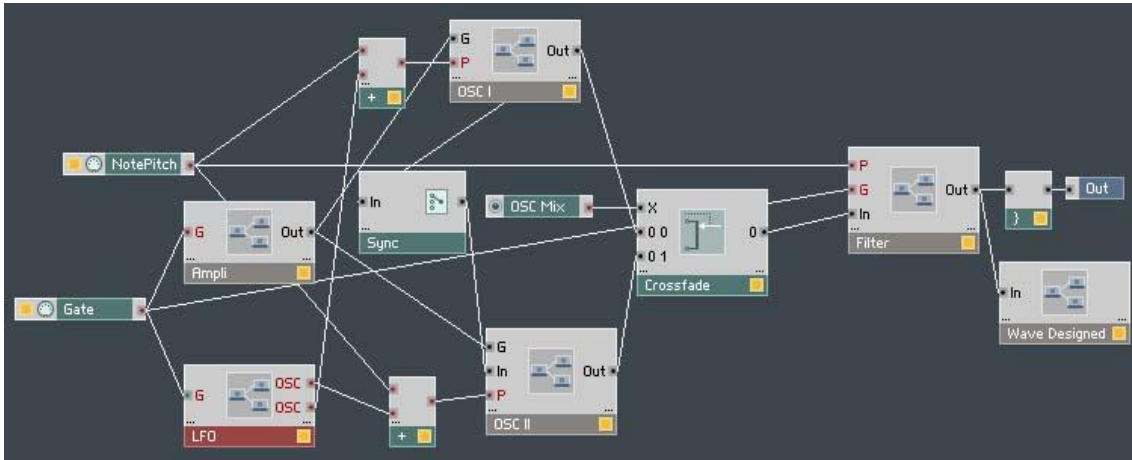
Quedará así todo el diseño:



Conectamos el LFO de la siguiente manera:

El gate general a su entrada, para que se active al pulsar la tecla, y las salidas hacia su respectivo OSC, interponiendo un sumador, y conectando también a éste la salida del NotePitch que iba directamente al OSC.

Así queda:



Haciendo pruebas, considero los siguientes cambios:

El switch de Gate es prescindible, ya que siempre quiero que vaya sincronizado al pulsar la nota.

Además, observo que el Rate, para frecuencias cortas de oscilación viene muy bien. Nos será muy útil para dar naturalidad a los sonidos para que suenen orgánicos. Pero también observo que aumentando los valores de Rate puedo llegar a crear efectos interesantes.

Así que creo un switch y un knob para Hi-Rate, o frecuencias altas del Rate, con el cual crearé dichos efectos.

Así quedará el panel externo:



Estudio en Frecuencia

La base de funcionamiento del LFO es la misma que la frecuencia modulada, pero a baja frecuencia. De ahí Low Frequency Oscillator (Oscilador de Baja Frecuencia).

Como hemos visto en nuestro diseño, la salida del LFO va conectada a la entrada que controla la frecuencia de nuestros osciladores. Dentro del LFO, el knob Cantidad, regula la amplitud de la onda que controla el oscilador, y Rate controla la frecuencia de esta onda. Podemos elegir qué tipo de onda queremos, además de a qué oscilador en concreto va a afectar.

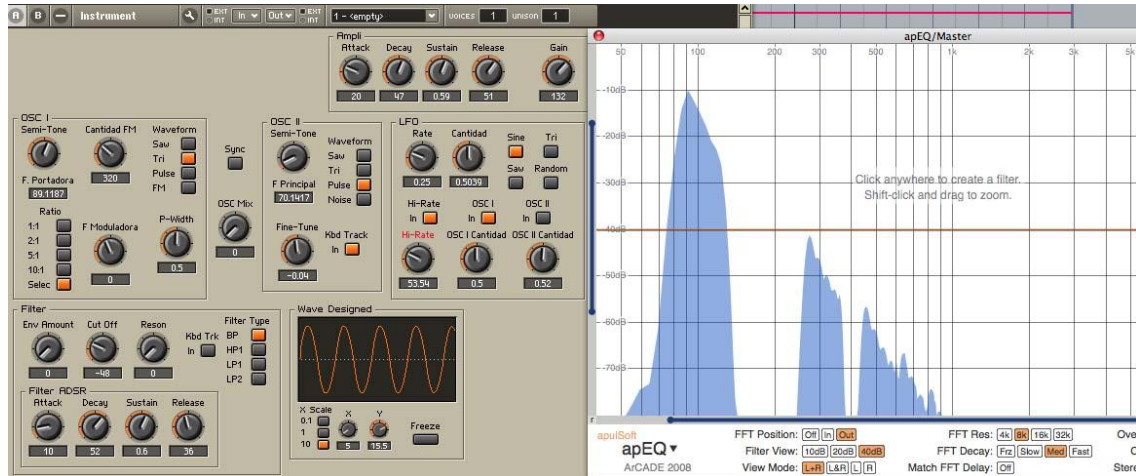
Probemos:

Generamos una onda triangular de 100 Hz desde el OSC I. Ahora desde el LFO, pulsamos el Sine para indicarle que queremos que sea un seno el que regule la frecuencia de nuestro OSC I, y por último pulsamos OSC I y giramos el knob de Cantidad de OSC I. Lógicamente en una captura no se puede apreciar, pero observamos como nuestra onda triangular oscila entre 50 y 200 Hz. Mejor escuchémoslo:



Si pongo a la mitad el knob de Cantidad en el LFO, observo que mi onda triangular oscila entre 72 y 145 Hz, lógicamente, a menos amplitud de la onda moduladora, menos espectro de frecuencia abarcará mi triangular. Ahora bajo a la mitad en nivel de envío desde el LFO al OSC I. Oscila desde 85 hasta 120 Hz.

Si pulso Hi-Rate y paso a modular en alta frecuencia (HLO), mi triangular variará también entre 85 y 120 Hz, pero mucho más rápido. De aquí que podamos realizar efectos interesantes. Aquí lo vemos:



Y escuchamos:



Por último, añadimos un pequeño diseño, y ya está terminado: ☺



6. CONCLUSIÓN

He querido ofrecer una visión didáctica y muy práctica de uno los programas más importantes hasta la fecha de native Instruments, Reaktor. Aumentando la complejidad de los diseños de Reaktor, seremos capaces de hacer todo lo que nos planteemos, pero creo que como primera aproximación a la síntesis, es más que suficiente. El alumno ha podido ver y escuchar los principales elementos de un sintetizador real, conocer parte de la historia de la música electrónica, así como saber de la existencia de los primeros instrumentos electrónicos.

Porque hoy en día el software se encuentra casi al nivel de los instrumentos hardware. Hasta hace 3 o 4 años, no podíamos cargar un *plugin* que considerábamos potente (compresor de Waves o eq de SSL) sin que nuestra CPU notara una disminución de su rendimiento. Hoy, cualquier ordenador medio puede ejecutarlos sin problemas, aunque sea congelando ciertos canales. Y es que los *plugs* han alcanzado una etapa de madurez en cuanto a calidad sonora. El listón ha subido mucho con los últimos lanzamientos de Izotope, T-Racks o Waves.

Espero que este proyecto sirva para *aprovecharnos* de las nuevas tecnologías, pero conociendo y habiendo estudiado los grandes sintetizadores clásicos. Si realmente nos gusta la música electrónica, debemos respetar a los grandes creadores del siglo pasado. Quienes sin ordenador o secuenciador alguno realizaban obras maestras.

Hoy en día podemos realizar grandes producciones solamente con un ordenador portátil y los programas e instrumentos previamente instalados. Incluso, posteriormente, mezclarlos y masterizarlos dignamente. Pero no debemos olvidar la calidez y calidad del hardware.

Alberto Sola Salguero
Marzo 2010