

Efectos digitales de la señal de audio

Helena Duxans Barrobés
Marta Ruiz Costa-jussà

PID_00188068



Los textos e imágenes publicados en esta obra están sujetos –excepto que se indique lo contrario– a una licencia de Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada (BY-NC-ND) v.3.0 España de Creative Commons. Podéis copiarlos, distribuirlos y transmitirlos públicamente siempre que citéis el autor y la fuente (FUOC. Fundación para la Universitat Oberta de Catalunya), no hagáis de ellos un uso comercial y ni obra derivada. La licencia completa se puede consultar en <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/legalcode.es>

Índice

Introducción	5
Objetivos	6
1. Introducción y clasificación de los efectos digitales de audio	7
1.1. ¿Qué es un efecto de audio?	7
1.2. Presencia de los efectos digitales de audio en la música actual ..	8
1.3. Clasificación de los efectos de audio	8
2. Efectos sonoros basados en retardadores	10
2.1. Sistema retardador basado en filtros de peine FIR	11
2.2. Sistema retardador basado en filtros de peine FIR con tiempo de retardo variable	12
2.3. Sistema retardador basado en filtros de peine IIR	14
2.4. Filtro reverberador	16
3. Efectos sonoros basados en moduladores	18
3.1. Estructura básica de un modulador de amplitud	19
4. Efectos sonoros basados en sistemas lineales	21
4.1. Sistemas lineales basados en filtros paso banda	21
4.2. Sistemas lineales basados en filtros de corte	22
5. Efectos sonoros basados en sistemas no lineales	24
5.1. Sistemas no lineales de tipo distorsionador	24
5.2. Sistemas no lineales de tipo rectificador de media onda	28
6. Otros tipos de efectos	30
6.1. Efectos espaciales	30
6.2. Efectos temporales	31
6.3. Metamorfosis de audio	31

Introducción

En este módulo explicamos qué es un efecto digital de audio y los ámbitos en que se aplican estas técnicas. A continuación hacemos una breve introducción a los efectos digitales de audio más habituales y proporcionamos ejemplos de audio de cada uno de estos efectos o referenciamos creaciones musicales que os puedan ser fáciles de encontrar. Además, para cada efecto, explicamos las bases teóricas del procesamiento digital de la señal de los sistemas que los generan. Para completar la teoría, también proporcionamos una implementación básica y genérica de cada sistema.

El campo de los efectos de audio es muy extenso, y los sistemas digitales para implementarlos aumentan en complejidad a medida que se requiere una salida de más calidad o de características o comportamiento muy particulares. El objetivo de las implementaciones que presentamos en este módulo es transmitir el concepto básico del efecto generado.

¿Por qué estudiar efectos digitales en señales de audio?

Los efectos digitales en música son una de las aplicaciones del procesamiento de audio más presentes en nuestra vida cotidiana. Más allá de la telefonía clásica, donde el procesamiento de audio tuvo sus inicios en el mundo comercial, o del almacenamiento de archivos de audio o multimedia, que complementó las aplicaciones de transmisión telefónica, los efectos digitales han ampliado las aplicaciones más académicas del procesamiento de audio para acercar la tecnología hacia las creaciones artísticas.

Por lo tanto, estudiar los efectos digitales de audio nos permitirá explorar diferentes campos de aplicación del procesamiento digital de audio.

Objetivos

Al finalizar este módulo, debéis ser capaces de lo siguiente:

1. Identificar un efecto digital cuando lo escuchéis.
2. Escoger qué tipo de sistema digital puede generar un efecto determinado.

1. Introducción y clasificación de los efectos digitales de audio

1.1. ¿Qué es un efecto de audio?

Un efecto de audio es cualquier modificación que se efectúa sobre una señal de audio que provoca un cambio en la percepción del sonido. Los cambios introducidos por los efectos son desde muy sutiles (por ejemplo, realzar alguna parte del audio o eliminar ruido de fondo) hasta cambiar totalmente el sonido original (por ejemplo, los efectos creados en música moderna con las guitarras eléctricas).

En este apartado nos centraremos en los efectos digitales de audio, en los que la modificación de la señal se lleva a cabo en el dominio digital, por medio de herramientas software o de dispositivos electrónicos dedicados. En la figura 1 se muestra un diagrama de bloques de un sistema digital de efectos de audio genérico:

Sistema digital para crear efectos de audio

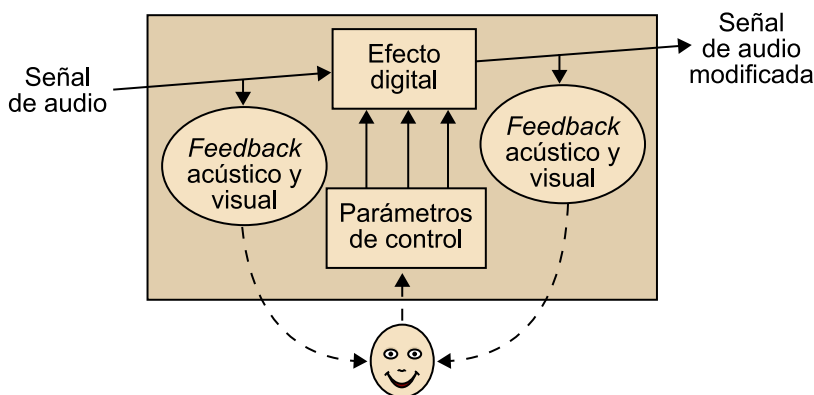


Figura 1. Diagrama de bloques funcional de un sistema digital para crear efectos sobre la señal de audio

La mayoría de los sistemas de modificación del audio permiten ajustar las características del efecto creado a partir de unos parámetros de control. Los ingenieros de sonido y los músicos ajustan estos parámetros para conseguir las características del sonido deseado a la salida.

Para ajustar los parámetros de control se necesita información de cómo es la señal de entrada en cada momento y cómo le afecta la modificación. Por esta razón, los dispositivos digitales para crear efectos disponen de herramientas de retroacción o *feedback*, que pueden ser acústicas (salidas de audio) o visuales (por ejemplo, barras de nivel luminosas). La utilización correcta de los parámetros de control para crear los efectos deseados en el audio de entrada es una tarea que requiere experiencia.

Ejemplo

A partir del sonido original, se ha generado un efecto trémolo (más sutil) y un efecto wah-wah (más extremo).

Parámetros de control

Nosotros mismos, cuando escuchamos un audio con un reproductor configurable (por ejemplo, una cadena hi-fi o un televisor), también podemos ajustar los parámetros de control del ecualizador que lleva incorporado para modificar el sonido que escuchamos. Así, en el caso de una cadena hi-fi, podemos conseguir la sensación de que sea en un teatro, un pabellón, etc., según lo que nos convenga y dependiendo de la música o el sonido que escuchemos.

Dos de los dispositivos electrónicos más utilizados para crear efectos de audio son las mesas de mezclas y los pedales de efectos.

1.2. Presencia de los efectos digitales de audio en la música actual

Actualmente, la modificación del audio de manera digital es una práctica presente en toda la cadena de producción, tanto de música como de material radiofónico y audiovisual profesional.

Fijaos, por ejemplo, en la música moderna. Los efectos digitales están presentes desde la generación del audio, por medio de dispositivos accionados por los músicos mientras tocan: muchos guitarristas y bajistas utilizan pedales de efectos para personalizar las interpretaciones, e incluso los teclados pueden llevar incorporados dispositivos de generación de efectos. En una etapa posterior, en el proceso de grabación y producción, las mesas de mezclas ofrecen a los ingenieros de sonido la capacidad de modificar el audio captado por cada micrófono para eliminar discordancias entre las grabaciones y añadir efectos que aportan cuerpo y matices nuevos a la música. Las modificaciones del audio llegan hasta la última etapa, la reproducción, cuando los ecualizadores de las cadenas hi-fi o las estaciones de radio se ajustan para adaptar la música a las características del oyente y el lugar de reproducción.

1.3. Clasificación de los efectos de audio

Existen muchas clasificaciones posibles de los efectos de audio: agrupándolos por el tipo de percepción que generan (por ejemplo, cambios ligeros o cambios profundos), agrupándolos según la finalidad (por ejemplo, efectos de interpretación o efectos de producción), etc.

En este apartado utilizamos una clasificación según el tipo de sistema digital que genera el efecto. La tabla 1 muestra los sistemas digitales principales y ejemplos de efectos que se pueden generar a partir de estos sistemas:

Sistemas digitales para crear efectos de audio

Tipo de sistema digital	Ejemplos de efectos que se pueden generar
Retardadores	<i>Doubling, slapback, eco, reverberación, flanging, vibrato, chorus</i>
Moduladores	<i>Wah-wah, phasing, trémolo, vibrato, flanging, chorus</i>
Sistemas lineales	<i>Wah-wah, phasing</i>
Sistemas no lineales	<i>Overdrive, distorsión, fuzz, octavador</i>

Tabla 1. Sistemas digitales para crear efectos de audio y ejemplos de los efectos que pueden crear.

Como se ve en la tabla 1, hay efectos que permiten alternativas en la implementación digital. Por ejemplo, el efecto *vibrato* se puede generar a partir de un sistema retardador o a partir de un modulador.

2. Efectos sonoros basados en retardadores

Un retardador añade al sonido original una versión o más de una versión del mismo sonido un tiempo después del sonido original.

En la figura 2 se muestra gráficamente el efecto de un retardador. La señal superior corresponde al audio de entrada al sistema, la señal intermedia es una versión atenuada, y retardada medio segundo del audio original, y la señal inferior es la salida del sistema, es decir, la suma de las dos señales anteriores:

Sistema retardador

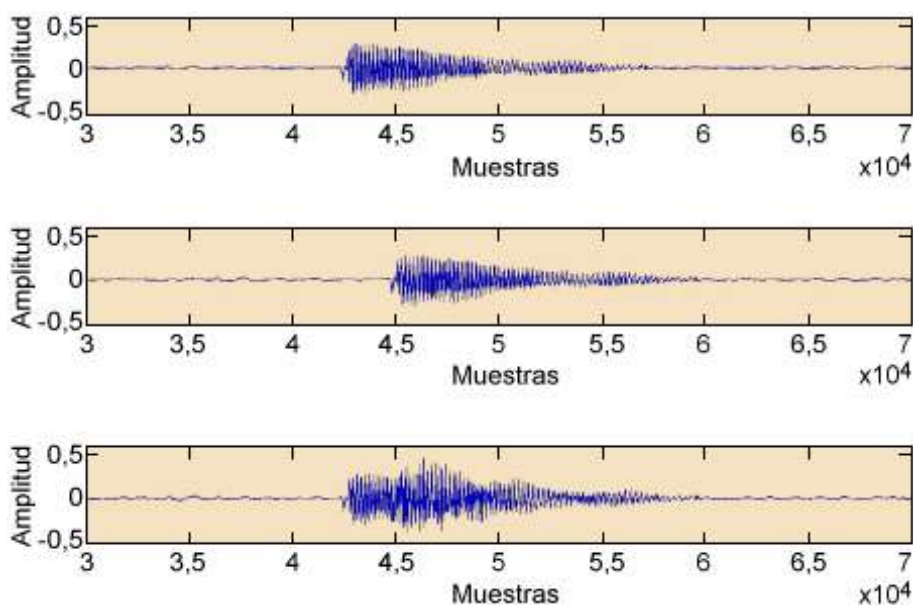


Figura 2. Arriba: señal original. En medio: versión atenuada y retardada medio segundo de la señal original. Abajo: señal de salida de un retardador

El efecto del retardo viene definido por tres parámetros:

- El tiempo de retardo: es el tiempo existente entre el sonido original y la primera de las versiones retardadas. Este valor se da en milisegundos.
- El número de retardos: número de veces que se retarda el sonido original, es decir, el número de versiones que hay en la salida del sistema. Este valor puede estar entre 1 e infinito.
- La atenuación: factor de modificación de energía de cada una de las versiones retardadas respecto a la versión anterior. En el caso de la primera versión, esta atenuación es respecto al sonido original.

Retardo síncrono

En el ámbito musical se define el retardo síncrono como el efecto de retardo en el que el tiempo de retardo es una fracción entera del *tempo*. Así, hay retardos en blancas, negras, corcheas, etc.

Los retardadores generan efectos de audio diferentes en función de los valores a los que se ajusten los parámetros de tiempo de retardo, número de retardos y atenuación.

2.1. Sistema retardador basado en filtros de peine FIR

El filtro de peine FIR se utiliza para introducir una sola versión retardada del sonido original, en la que el retardo es un valor constante. Por lo tanto, los efectos que se pueden generar con esta estructura son del tipo siguiente:

- Tiempo de retardo: constante
- Número de retardos: uno
- Atenuación: constante

Si τ es el tiempo de retardo, α la ganancia del audio original a la salida y β la ganancia (inverso de la atenuación) de la versión retardada, la ecuación de diferencias del retardador único es la siguiente:

$$y[n] = \alpha x[n] + \beta x[n - M]$$

Filtro peine FIR

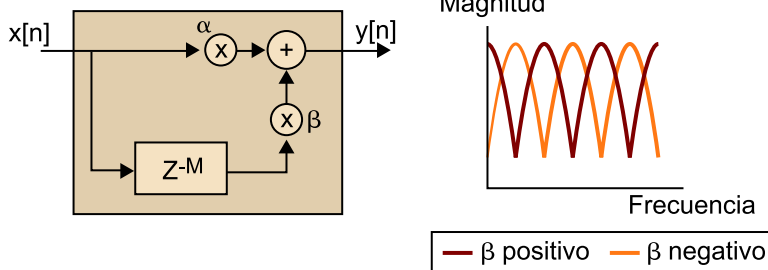


Figura 3. Sistema retardador basado en un filtro de peine FIR: diagrama de bloques (izquierda) y magnitud de la respuesta frecuencial (derecha)

Como veis, tanto en la ecuación como en la figura 3 la respuesta en tiempo del filtro es el sonido original más una versión retardada de M muestras y modificada en amplitud por un factor β .

La función de transferencia del filtro de peine es la siguiente:

$$H(z) = \alpha + \beta z^{-M}$$

En la figura 3, a la derecha, se muestra la respuesta frecuencial de este filtro. Para valores de β positivos, el filtro amplifica todas las frecuencias múltiples de $\frac{1}{T}$ y atenúa las frecuencias intermedias. La forma de la respuesta frecuencial del filtro, similar a las púas de un peine, ha dado nombre al filtro.

Lectura de la fórmula

$x[n]$ es el sonido original.
 $y[n]$ el sonido con el efecto

$$M = \frac{\tau}{f_m}$$

f_m es la frecuencia de muestreo.

A continuación describimos los efectos generados utilizando el filtro de peine FIR:

- **Doubling o double tracking.** El efecto *doubling* o *doubletracking* consiste en añadir una versión retardada muy pocos milisegundos al audio original ($0 < \tau \leq 10$ milisegundos). Este efecto se utiliza sobre todo para dar cuerpo a las partes vocales de piezas de música, aunque también se puede emplear para las partes instrumentales. Perceptivamente, este efecto simula que hay dos personas (o instrumentos) cantando en coro la misma melodía, pero que las dos personas (o instrumentos) tienen la misma identidad.
- **Slapback.** El efecto *slapback* está muy relacionado con el de *doubling*. Como el *doubling*, este efecto introduce una sola versión retardada del audio original, pero con un tiempo ligeramente superior, en torno a decenas de milisegundos ($25 \leq M \leq 50$ milisegundos). Perceptivamente, si permanecemos atentos se oye una repetición rápida del audio original. El *slapback* es un efecto característico de las partes vocales del *rock-and-roll* de los años cincuenta, a pesar de que también se utiliza a veces en instrumentos de percusión.

Ejemplo

Ejemplo del efecto *slapback*: grabación original y después de aplicar el efecto.

Ejemplo

Los Beatles utilizaban el *doubling* con bastante frecuencia, como por ejemplo en *A Hard Day's Night* (1964).

Ejemplo del efecto *doubling*: grabación original y después de aplicar el efecto. También oiréis un efecto *doubling* en el vídeo *Vocal Doubling | TC-Helicon Making Hit Vocales Ep. 4*.

2.2. Sistema retardador basado en filtros de peine FIR con tiempo de retardo variable

El filtro de peine FIR con retardo variable se utiliza para introducir una sola versión retardada del sonido original, pero en la que el tiempo de retardo varía con el tiempo. En este caso, el valor de M (muestras de retardo) deja de ser una constante para convertirse en una función dependiente del tiempo ($M(n)$: retardo correspondiente a la muestra n). Por lo tanto, los efectos que se generan con esta estructura son del tipo siguiente:

- Tiempo de retardo: variable
- Número de retardos: uno
- Atenuación: constante

La ecuación de diferencias de este tipo de filtros se puede escribir de la manera siguiente:

$$y[n] = \alpha x[n] + \beta x[n - M(n)]$$

Filtro de peine FIR con retardo variable

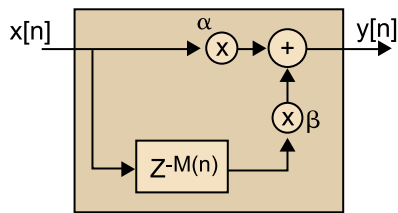


Figura 4. Diagrama de bloques de un sistema retardador basado en un filtro de peine FIR con retardo variable

La función de transferencia de este tipo de filtro varía con el tiempo. En todo momento tiene forma de peine (podéis ver la parte derecha de la figura 3), pero las púas varían ligeramente la posición y la amplitud según el valor de M cada vez.

A continuación describimos los efectos generados utilizando filtros de peine FIR con retardo variable:

- **Flanging.** El efecto *flanging* provoca un sonido metalizado oscilante, sobre todo en frecuencias medias y altas, superpuesto al audio original. Alguno de los ejemplos de canciones en que se utiliza este efecto son *(Just Like) Starting Over* (1980) de John Lennon –solo en la última frase de la canción– e *It's My Life* (2003) de No Doubt.

El efecto *flanging* se consigue mezclando el audio original con una única versión retardada en el tiempo, pero con la particularidad de que el tiempo de retardo es muy breve y varía de manera periódica.

Habitualmente, para el efecto *flanging*, el retardo $M(n)$ es una función triangular o sinusoidal; por ejemplo:

$$M(n) = M_0(1 + A \sin(2\pi f n T))$$

La función $M(n)$ no siempre devuelve valores de retardos que se corresponden con muestras enteras (por ejemplo, puede ser $M(n) = 9,66$). Para obtener los valores de $x[n]$ para valores de n no enteros (por ejemplo, para $n=9,66$) se utilizan técnicas de redondeo.

En la era analógica, el efecto *flanging* se creaba mezclando el audio proveniente de dos cintas que contenían la misma grabación, pero tocando alternativamente las pestañas de las ruedas de giro (en inglés, *flange*) de cada una, para provocar que una de las cintas se reprodujera más lentamente que la otra y crear retardos entre ellas. Esto dio origen a su nombre.

Lectura de la fórmula

f es la frecuencia que marca la velocidad de *flanging*.

A es el valor máximo de variación del tiempo de retardo respecto a M_0

M_0 es el valor medio del tiempo de retardo.

Los valores habituales de M_0 están entre 0 y 15 milisegundos.

Ejemplo

En el fichero `flanging_original_y_efecto.mp3` oiréis un sonido seguido de dos modificaciones al que se ha aplicado el efecto *flanging*.

Otro ejemplo de *flanging* lo encontraréis en el vídeo *Effects 101: Flanger*.

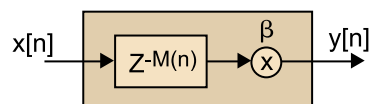
- **Vibrato.** El efecto *vibrato* consiste en introducir variaciones casi periódicas en la frecuencia de un sonido. Perceptivamente, el oyente escucha el sonido original, pero como si temblara. Algunos ejemplos de *vibratos* que se producen de manera natural, es decir, sin procesar el audio, son los generados por violines (o, en general, por los instrumentos de cuerda), cuando se hace temblar el dedo que presiona la cuerda, o el de las cuerdas vocales, cuando se provocan variaciones de tensión al cantar.

Digitalmente, el efecto *vibrato* tiene una implementación directa mediante un modulador, pero también se puede implementar por medio de un filtro retardador, simulando el efecto Doppler¹.

Fijaos en que la diferencia principal entre el efecto *vibrato* y el resto de los efectos basados en estructuras retardadoras es que en el *vibrato* desaparece el sonido original. Esto significa que el sonido resultante de aplicar el efecto solo contiene la versión retardada del sonido original.

Por tanto, para crear el efecto *vibrato*, se elimina el camino directo (sin retardo) del sistema FIR o, dicho de otro modo, $\alpha = 0$. Así, la estructura retardadora queda como se muestra en la figura 5:

Figura 5. Sistema retardador para crear el efecto *vibrato*



Efecto *vibrato*

$$y[n] = \beta x[n - M(n)]$$

En el efecto *vibrato*, el rango habitual para los valores de $M(n)$ está entre 5 y 10 milisegundos.

2.3. Sistema retardador basado en filtros de peine IIR

El filtro de peine IIR se utiliza para introducir un número infinito de versiones retardadas del sonido original. Por lo tanto, los efectos que se pueden generar con esta estructura son del tipo siguiente:

- Tiempo de retardo: constante
- Número de retardos: infinitos
- Atenuación: constante

En este tipo de sistemas, la señal original circula por una línea de retardo que se suma de nuevo a la entrada. Cada vez que se retarda la señal se modifica la amplitud por la ganancia del retardador. En la figura 6 encontraréis una representación del filtro de peine IIR:

⁽¹⁾El efecto Doppler explica por qué se perciben variaciones en la frecuencia de un sonido cuando hay un movimiento relativo entre la fuente acústica y el receptor. La variación de frecuencia percibida se debe al hecho de que la distancia entre la fuente acústica y el receptor varía.

Un ejemplo del efecto Doppler es cuando oímos la sirena de una ambulancia que pasa cerca de nosotros. Cuando la ambulancia se acerca a nosotros, aumenta la frecuencia que percibimos, y cuando se aleja, disminuye.

Para simular el efecto Doppler, en lugar de variar la distancia entre la fuente acústica y el receptor se lleva a cabo una acción equivalente: modificar el tiempo de retardo entre la fuente y el receptor. Cuando el retardo varía periódicamente se produce una variación periódica en la frecuencia percibida y, por lo tanto, se produce un *vibrato*.

Ejemplo

Ejemplo de vibrato.

Filtro peine IIR

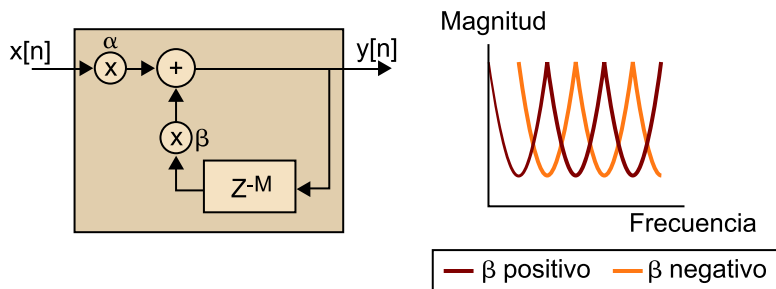


Figura 6. Sistema retardador basado en un filtro de peine IIR

Si τ es el tiempo de retardo y β la ganancia (inverso de la atenuación) de las versiones retardadas, la ecuación de diferencias del filtro de peine IIR es la siguiente:

$$y[n] = \alpha x[n] + \beta y[n - M]$$

La función de transferencia es la siguiente:

$$H(z) = \frac{\alpha}{1 - \beta z^{-M}}$$

Observad que se modifica la amplitud de cada versión retardada de la señal original por un factor α^p , donde p es el número de veces que la señal ha sido retardada. Para garantizar la estabilidad del filtro, el valor de β debe ser más pequeño que 1, porque si no, la señal de salida crecerá sin límite.

En la figura 6, a la derecha, se muestra la respuesta en frecuencia del filtro de peine IIR. Como en el caso del filtro FIR, se amplifican todas las frecuencias múltiples de $\frac{1}{T}$ y se atenúan las frecuencias intermedias. La diferencia principal se encuentra en la amplitud de los picos. En los filtros de peine IIR, la amplitud de los picos se estrecha a medida que el valor α se acerca a 1.

A continuación describimos los efectos generados utilizando filtros de peine IIR:

- Eco.** El efecto eco consiste en añadir al audio original múltiples versiones retardadas y atenuadas, imitando el eco original que se genera en la naturaleza. Para apreciar los retardos como eco, el tiempo del retardo debe ser superior a 50 milisegundos ($\tau > 50$ milisegundos). Las versiones se van atenuando hasta que se vuelven imperceptibles. El efecto eco también se puede generar con un filtro de peine FIR, si el objetivo es generar una sola versión retardada. Para generar un número no infinito de versiones retardadas, se pueden utilizar filtros FIR encadenados.
- Chorus.** El efecto *chorus* consiste en añadir al audio original múltiples copias retardadas entre 10 y 25 milisegundos respecto al original ($10 \leq \tau(n) \leq 25$ milisegundos) y con pequeños cambios aleatorios en el tiempo de

Lectura de la fórmula

$x[n]$ es el sonido original.
 $y[n]$ es el sonido con el efecto

$$M = \frac{\tau}{f_m}$$

f_m es la frecuencia de muestreo.

Ejemplo

Ejemplo del efecto eco: grabación original y después de aplicar el efecto.
 Otro ejemplo de esto lo encontraréis en el vídeo Effects 101: Delay.

Ved también

Recordad que hemos hablado sobre el eco en el último apartado del módulo "Introducción a la acústica".

retardo. El efecto creado es que al audio original lo acompaña un “coro”, y por eso tiene este nombre.

Ejemplo

Encontraréis un ejemplo de *chorus* en el vídeo Effects 101: Chorus.

2.4. Filtro reverberador

La estructura más simple de un filtro reverberador es una combinación de filtro de peine FIR e IIR, tal y como indica la siguiente ecuación y se muestra en la figura 7:

$$y[n] = -gx[n] + x[n - m] + gy[n - m]$$

Filtro reverberador

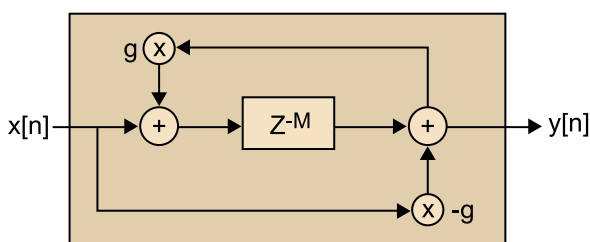


Figura 7. Diagrama de bloques de la estructura más básica de un filtro reverberador

Los sistemas más sofisticados para crear reverberaciones utilizan modelos acústicos de entornos reales o virtuales para convolucionarlos con el audio que se debe modificar, y así transmitir las características de propagación del entorno al sonido.

Con un filtro reverberador se consigue un efecto de reverberación que consiste en crear una reverberación artificial en el audio de entrada. Perceptivamente, el efecto de reverberación aporta calidez al sonido.

Recordemos que la reverberación natural se genera por la reflexión del sonido, que llega al oyente cuando todavía no se ha extinguido el sonido original. Por lo tanto, este efecto está formado por múltiples versiones retardadas que se suman al original; los retardos de cada una de las versiones, es decir, el valor de τ , no supera los 50 milisegundos. Para valores de retardo superiores, ya no se percibe reverberación, sino un efecto más parecido al eco.

Un retardador añade al sonido original una versión o más de una versión del mismo sonido un tiempo después del sonido original.

Los retardadores se definen por medio de tres parámetros: el tiempo de retardo (que puede ser constante o variable), el número de versiones retardadas (entre una e infinitas) y la atenuación de cada versión respecto a la anterior. Los valores de estos tres parámetros determinan el efecto creado.

Ved también

Recordad que hemos hablado sobre la reverberación en el último apartado del módulo “Introducción a la acústica”.

Ejemplo

Ejemplo del efecto reverberación: sonido seguido con diferentes efectos de reverberación (efecto creado por Nazca Paul con el sintetizador software ZynAddSubFX).

Otro ejemplo lo encontraréis en el vídeo Effects 101: Reverb.

Los filtros de peine FIR se utilizan para implementar efectos con solo una versión retardada respecto al original.

Los filtros de peine IIR generan infinitas versiones retardadas del audio original (eco, reverberación, *chorus* y *vibrato*).

Para generar un número finito de versiones retardadas se pueden utilizar múltiples filtros de peine FIR encadenados.

En la tabla siguiente se presenta un resumen de los efectos generados con estructuras retardadoras, en la que se recogen los valores orientativos de tiempos de retardo, tipo de modulación por los retardos variantes y número de retardos para cada uno de los efectos presentados:

Efecto	Tiempo de retardo	Modulación	Número de retardos	Sistema generador basado en
<i>Doubling</i>	<10 ms	---	1	Filtros de peine FIR
<i>Slapback</i>	25 ms - 50 ms	---	1	Filtros de peine FIR
<i>Flanging</i>	0 ms - 15 ms	Sinusoidal (0,1 Hz - 1 Hz)	1	Filtros de peine FIR, retardo variable
<i>Vibrato</i>	5 ms - 10 ms	Sinusoidal (5 Hz - 14 Hz)	1	Filtros de peine FIR, retardo variable y ganancia camino directo = 0
Eco	>50 ms	---	1 - infinitos	Filtros de peine IIR
<i>Chorus</i>	10 ms - 25 ms	Aleatoria	1 - infinitos	Filtros de peine IIR
Reverberación	<50 ms	---	Infinitos	Filtro reverberador

3. Efectos sonoros basados en moduladores

La modulación es el proceso de modificación de los parámetros de una señal, denominada señal portadora, según otra señal, denominada señal moduladora. Concretamente, mediante la modulación se pueden modificar tres parámetros de la señal portadora:

- La amplitud.
- La frecuencia.
- La fase.

La figura 8 muestra un ejemplo de modulación de amplitud:

Modulación de amplitud

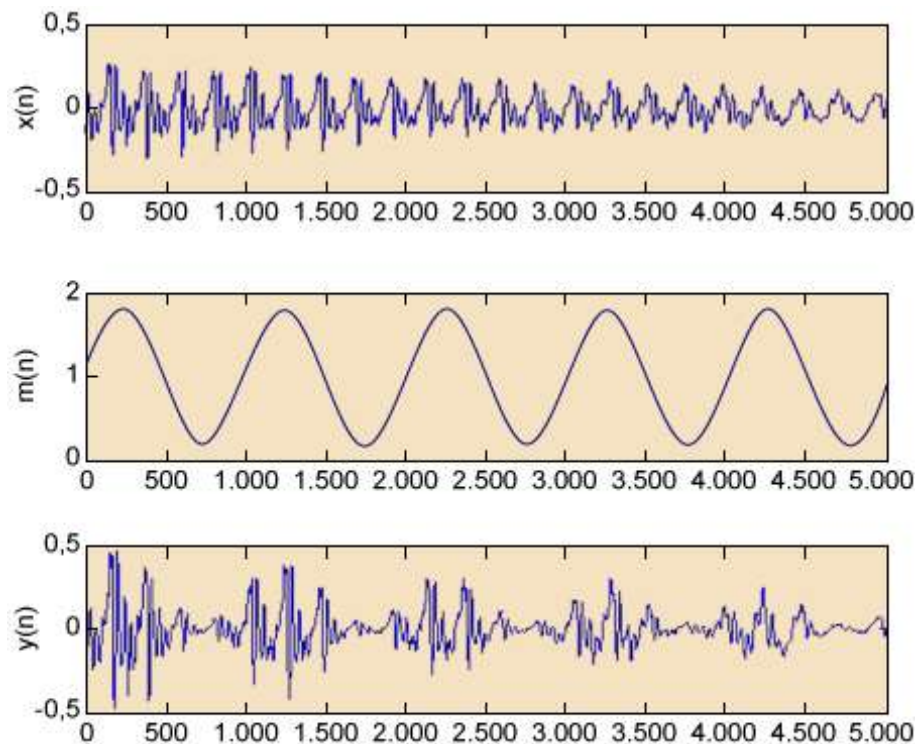


Figura 8. Modulación de amplitud: $x[n]$ se corresponde con la señal de entrada (portadora), $m[n]$ se corresponde con la señal moduladora e $y[n]$ es el resultado de la modulación en amplitud.

La señal superior de la figura 8 es el audio original (portadora), la señal intermedia es la señal que actúa como señal moduladora (una señal sinusoidal) y la señal inferior es la señal resultante de la modulación. Observad cómo la señal modulada sigue una evolución temporal igual que la original, únicamente cambia la amplitud, dependiendo de los valores de la señal sinusoidal que actúa como moduladora.

Los moduladores pueden generar varios efectos en el audio. De hecho, son implementaciones alternativas para generar efectos que normalmente se efectúan con otro tipo de sistemas, como *vibrato*, *flanger* o *chorus*, que se pueden implementar con un modulador de fase.

En este apartado analizaremos solo los efectos basados en modulación de amplitud.

3.1. Estructura básica de un modulador de amplitud

Un esquema simple de modulador AM (*amplitude modulator*) es el siguiente:

Modulador AM

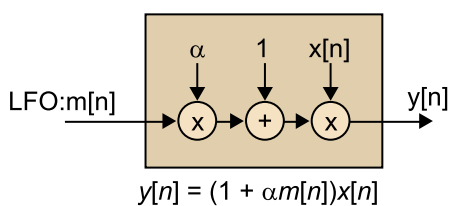


Figura 9. Modulador de amplitud: señal moduladora $m[n]$, señal portadora $x[n]$ y señal modulada $y[n]$

Como señal moduladora habitualmente se utiliza un oscilador de baja frecuencia, denominado también *oscilador de baja frecuencia* o *low frequency oscillator* (LFO), con una amplitud de pico igual a 1.

A continuación describimos el efecto trémolo², efecto creado utilizando moduladores de amplitud. El efecto trémolo consiste en introducir una fluctuación de la amplitud (es decir, del volumen) del audio, sin afectar al contenido frecuencial original.

El trémolo proviene de antes de la música electrónica. Se encuentra sobre todo en interpretaciones con instrumentos clásicos de cuerda. Un ejemplo de trémolo no digital se halla en la pieza *Recuerdos de la Alhambra*, de Francisco Tárrega. Para crear un trémolo en instrumentos de cuerda, se debe frotar la cuerda (con la horquilla o con los dedos) de manera repetitiva, ejecutando la misma nota.

El trémolo es un efecto complementario al *vibrato* (fluctuación de la frecuencia). Los trémolos creados por instrumentistas o cantantes, sin procesamiento digital de la señal, suelen ir acompañados de *vibratos*. La manipulación digital del audio ha facilitado conseguir *vibratos* y trémolos puros.

Lectura de la imagen

$x[n]$ es el audio original.
 $m[n]$ es la señal moduladora.
 α es el coeficiente que determina la profundidad de la modulación.
 $y[n]$ es la señal modulada.
 El efecto de la modulación es máximo para un valor $\alpha = 1$ y no tiene ningún efecto para $\alpha = 0$.

⁽²⁾El nombre de *trémolo* proviene del término italiano *tremolo*, que significa 'tembloroso'.

Ejemplo

Ejemplo del efecto trémolo: grabación original y después de aplicar el efecto.
 Encontraréis otro ejemplo en el vídeo Effects 101: Tremolo

Para crear el efecto trémolo digitalmente, la frecuencia de la LFO del modulador AM debe estar por debajo de 20 Hz. Para frecuencias superiores, nuestro oído es capaz de distinguir la presencia de la señal moduladora como un componente espectral diferenciado y, por lo tanto, puede percibir el tono de la señal moduladora (que en este caso actúa como portadora), la suma (portadora + original) y la diferencia (portadora – original).

La modulación de amplitud consiste en modificar la amplitud de una señal según una señal moduladora.

El efecto trémolo se puede implementar por medio de un modulador de amplitud en el que la señal moduladora es un oscilador de baja frecuencia (por debajo de 20 Hz).

Ejemplo

Ejemplo de efecto trémolo generado a partir de un tono de 220 Hz y modulado a 10 Hz y ejemplo de efecto trémolo modulado a 150 Hz. Fijaos que este último audio no es un trémolo.

4. Efectos sonoros basados en sistemas lineales

En este apartado presentaremos los efectos digitales que se pueden crear con sistemas compuestos a partir de los filtros básicos explicados en el módulo “Diseño y análisis de filtros en procesamiento de audio”. Tal como explicamos, un filtro digital se puede definir como un sistema que modifica una señal de audio, de manera que deja pasar un determinado intervalo de frecuencias, con una ganancia determinada, y atenúa otras.

Ved también

Recordad la definición de sistema lineal que hemos visto en el apartado “Señales y sistemas” del módulo “Conceptos de señales y sistemas”.

Los filtros más utilizados para crear sistemas lineales generadores de efectos de audio son los filtros paso banda y los filtros de corte. En la figura 10, a modo de ejemplo, se muestra la respuesta frecuencial de un filtro paso banda y un filtro de corte³:

⁽³⁾Un filtro de corte atenúa una banda estrecha de frecuencias alrededor de una frecuencia concreta

Respuesta frecuencial de los filtros

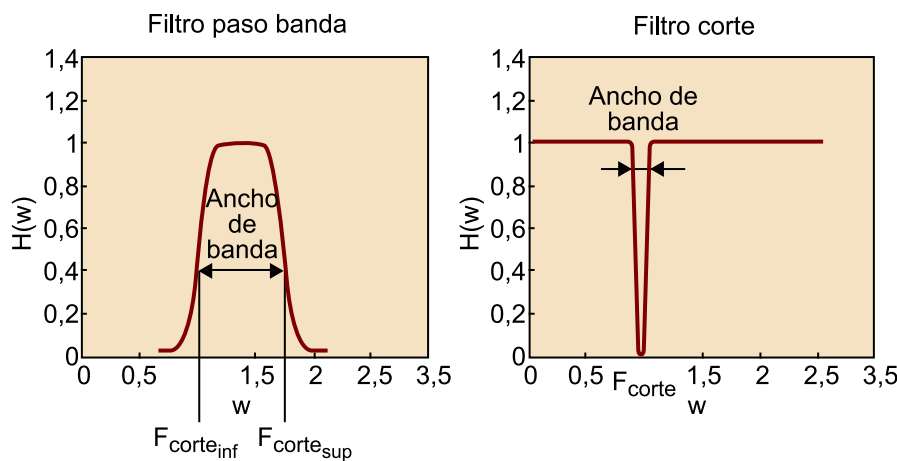


Figura 10. Respuesta frecuencial de un filtro paso banda (izquierda) y de un filtro de corte (derecha)

4.1. Sistemas lineales basados en filtros paso banda

El sistema lineal basado en filtros paso banda más utilizado para crear efectos digitales de audio sigue el diagrama de bloques que se muestra en la figura 11:

Sistema lineal basado en un filtro paso banda

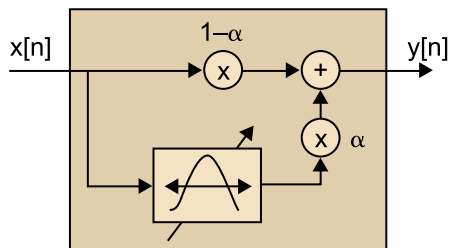


Figura 11. Diagrama de bloques de un sistema lineal que incorpora un filtro paso banda, con una frecuencia central de la banda de paso que varía con el tiempo. El parámetro α se corresponde con la ganancia de la señal filtrada.

La respuesta del sistema consiste en la suma de la señal de entrada $x[n]$, amplificada por un factor $(1-\alpha)$, con la señal de entrada filtrada por un filtro paso banda. La principal característica de este sistema es que incorpora un filtro paso banda en el que la frecuencia central de la banda de paso varía con el tiempo.

A continuación describimos el efecto *wah-wah*, efecto conseguido utilizando filtros paso banda. El efecto *wah-wah* consiste en aplicar al audio original un filtro paso banda de frecuencia central variable en el tiempo y de ancho de banda estrecho. Esta versión filtrada se añade al audio original para conseguir el efecto deseado. Cuando la frecuencia central varía de un valor bajo a un valor alto, se produce un sonido que recuerda la voz humana pronunciando la interjección *uaaa-uaaa* (por ello tiene este nombre).

El guitarrista Jimi Hendrix popularizó este efecto a finales de los años sesenta (lo encontramos, por ejemplo, al principio de la canción *Voodoo Child (slight return)* de 1968).

Este efecto se aplica sobre todo a guitarras eléctricas y bajos, a pesar de que también se encuentra en otros instrumentos electrónicos. Los dispositivos que se utilizan para crear este tipo de efecto en guitarras y bajos se denominan pedales de *wah-wah*, dado que son unos pedales que los músicos activan con el pie. Estos pedales contienen un procesador de la señal que varía la frecuencia central de la banda de paso según la presión sobre el pedal.

En la etapa de producción de audio, también se puede crear el efecto *wah-wah* sustituyendo el pie del guitarrista por un oscilador de baja frecuencia, creando variaciones de la frecuencia central de manera periódica y automática. Entonces el efecto toma el nombre de *autowah*.

Ejemplo

Ejemplo de efecto aislado de wah-wah aplicado a un tono puro.

También encontraréis un ejemplo de efecto *wah-wah* en el vídeo *Effects 101: Wah*.

4.2. Sistemas lineales basados en filtros de corte

El sistema lineal basado en filtros de corte más utilizado para crear efectos digitales de audio combina una secuencia de filtros de corte variantes en el tiempo con el audio original, tal como se muestra en la figura 12:

Sistema lineal basado en filtros de corte

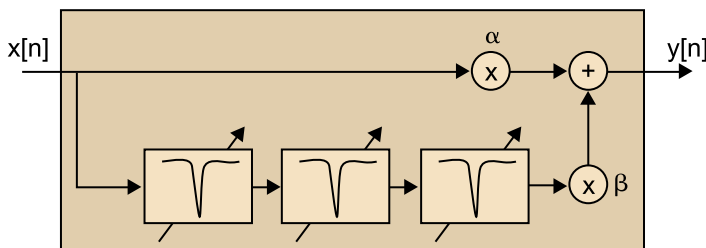


Figura 12. Sistema lineal formado por una cascada de filtros de corte con la frecuencia de corte variando con el tiempo

El resultado de este tipo de sistemas es una señal similar a la señal de entrada, pero con múltiples frecuencias atenuadas.

A continuación, describimos el efecto *phasing*, efecto que se consigue utilizando filtros de corte. El *phasing* es un efecto perceptivamente similar al *flanging*, es decir, un sonido metalizado oscilante, sobre todo en frecuencias medias y altas, superpuesto al audio original.

Para crear este efecto, la frecuencia de corte del filtro varía con el tiempo por medio de un oscilador de baja frecuencia.

La diferencia principal entre el *phasing* y el *flanging* es que el primero aplica un número finito de cortes (infinito para el *flanging*) y que los cortes puede que no sean equidistantes (sí para el *flanging*).

Ejemplo

Encontraréis un ejemplo del efecto *phasing* en el vídeo Efectos 101: Phaser.

Los filtros más utilizados para crear sistemas lineales generadores de efectos de audio son los filtros paso banda y los filtros de corte.

El efecto *wah-wah* consiste en aplicar al audio original un filtro paso banda de frecuencia central variable en el tiempo y de ancho de banda estrecho. Esta versión filtrada se añade al audio original para conseguir el efecto deseado.

El efecto *phasing*, que se percibe como un sonido metalizado oscilante, se genera utilizando una secuencia de filtros de corte, con la frecuencia variando con el tiempo por medio de un oscilador de baja frecuencia.

5. Efectos sonoros basados en sistemas no lineales

Un sistema lineal a la salida no introduce componentes frecuenciales nuevos en la señal de entrada, sino que solo varía la amplitud y la fase de los componentes frecuenciales de la entrada. En cambio, los sistemas no lineales también introducen componentes frecuenciales nuevos (armónicos⁴ o inarmónicos⁵) que no estaban presentes en la señal de entrada.

⁽⁴⁾Dado un tono a una frecuencia fundamental (por ejemplo, 440 Hz), los componentes armónicos de este tono son todos los tonos que hay en una frecuencia múltiple de la fundamental (880 Hz, 1.320 Hz, etc.)]

Para medir el grado de no-linealidad de un sistema se utiliza la distorsión armónica total o *total harmonic distortion* (THD), que se define de la manera siguiente:

⁽⁵⁾Dado un tono a una frecuencia fundamental (por ejemplo, 440 Hz), se denomina componente inarmónico a cualquier tono que no es armónico (por ejemplo, 520 Hz).

$$THD = \sqrt{\frac{A_2^2 + A_3^2 + \dots + A_N^2}{A_1^2 + A_2^2 + \dots + A_N^2}}$$

Es decir, es el valor de la raíz cuadrada de la ratio de la potencia de todas las frecuencias armónicas introducidas por el sistema no lineal (fijaos en que el numerador no incluye A_1) respecto a la potencia total de la señal de salida del sistema. Cuanto más alto es el valor de THD, más no lineal es el sistema.

5.1. Sistemas no lineales de tipo distorsionador

El distorsionador es el sistema no lineal más utilizado en la creación de efectos de audio. Un distorsionador es un sistema no lineal basado en un amplificador, en el que la ganancia $g[n]$ depende del nivel de señal de entrada. En la figura 13 se muestra el diagrama de bloques de un distorsionador:

Distorsionador

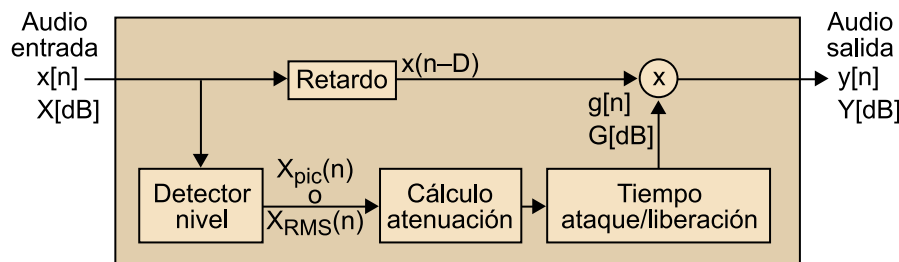


Figura 13. Diagrama de bloques de un distorsionador

El funcionamiento del sistema representado en la figura es el siguiente. Para cada instante se detecta el nivel de audio de entrada (nivel de pico⁶ $x_{pico}[n]$ o nivel de RMS⁷ $x_{rms}[n]$), según el procedimiento utilizado y de este nivel se determina la ganancia $g(n)$ que se aplicará a la señal de entrada $x[n - D]$ para generar la salida $y[n]$:

⁽⁶⁾El nivel de pico de una señal se calcula a partir de los valores de pico (valor absoluto) de las muestras de la señal de entrada, medidas durante un periodo de tiempo. El valor se da en decibelios.

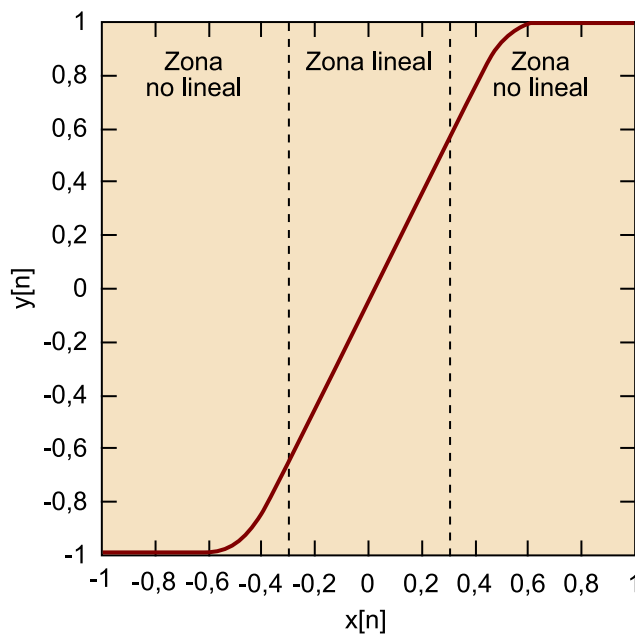
$$y[n] = g(n)x[n - D]$$

El retardo de D muestras que se aplica a la señal de entrada es para compensar el retardo introducido por los módulos de detección de nivel y cálculo de la ganancia.

La función utilizada para calcular la ganancia determina el efecto producido en el audio. Teóricamente, se puede utilizar cualquier función para crear efectos, pero no todos sonarán “deseables” a nuestros oídos. Las funciones más utilizadas para calcular la ganancia son las siguientes:

- **Soft clipping simétrico.** Los efectos de distorsión provienen de la época en la que los amplificadores estaban contruidos con válvulas y no con microprocesadores, por ejemplo. Las válvulas tienen una respuesta no lineal cuando se encuentran en un punto de funcionamiento cerca del punto de saturación que tienen. En la actualidad, el procesamiento digital intenta simular el comportamiento de las válvulas para crear las distorsiones. El *soft clipping* es una aproximación a la respuesta de las válvulas analógicas de los amplificadores. La figura 14 muestra su comportamiento.

Soft clipping simétrico



$$y[n] = \begin{cases} 2x[n] & \text{per } 0 \leq |x[n]| \leq 1/3 \\ \frac{x[n]}{|x[n]|} \left(\frac{3 - (2 - 3|x[n]|)^2}{3} \right) & \text{per } 1/3 \leq |x[n]| \leq 2/3 \\ 1 & \text{per } 2/3 \leq |x[n]| \leq 1 \end{cases}$$

Figura 14. Relación entre la señal de entrada $x[n]$ y la señal de salida $y[n]$ para el *soft clipping* simétrico

Observad que existen tres zonas con ganancias diferentes: una zona no lineal inferior, una zona lineal central y una zona no lineal superior. Este *soft clipping* se denomina simétrico porque las zonas no lineales tienen comportamientos simétricos.

(7) Por su parte, el nivel de media cuadrática o *root mean square* (RMS) de una señal es la media de los valores de un segmento de n muestras, calculado de la manera siguiente:

$$x_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{x_m^2 + x_{m+1}^2 + \dots + x_{m+n-1}^2}{n}}$$

El valor se da en decibelios.

La figura 15 muestra la salida de este distorsionador cuando se aplica una señal sinusoidal en la entrada:

Soft clipping

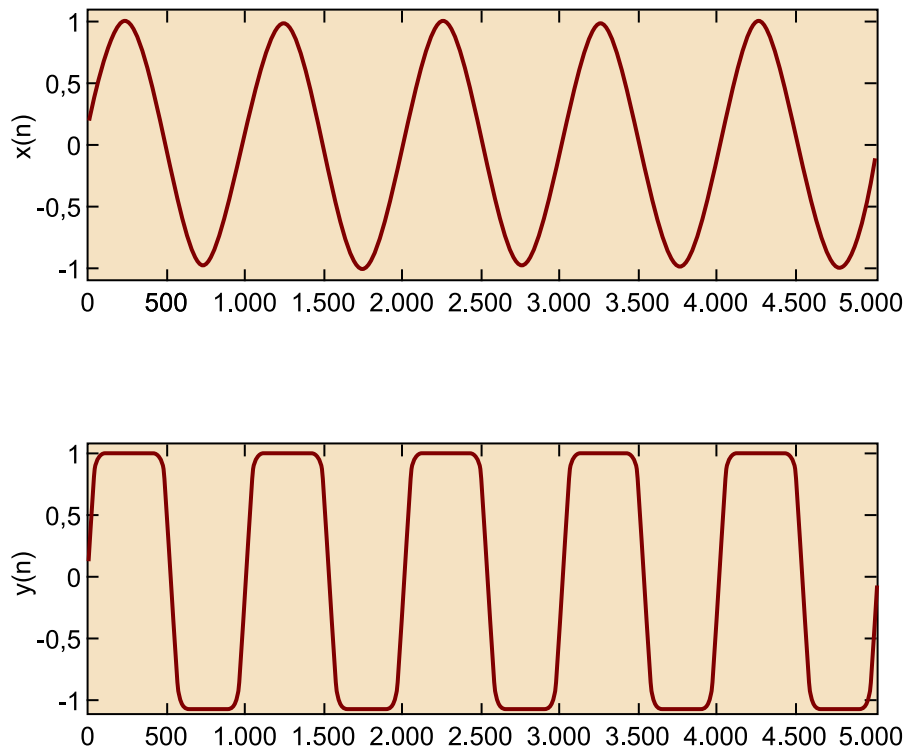
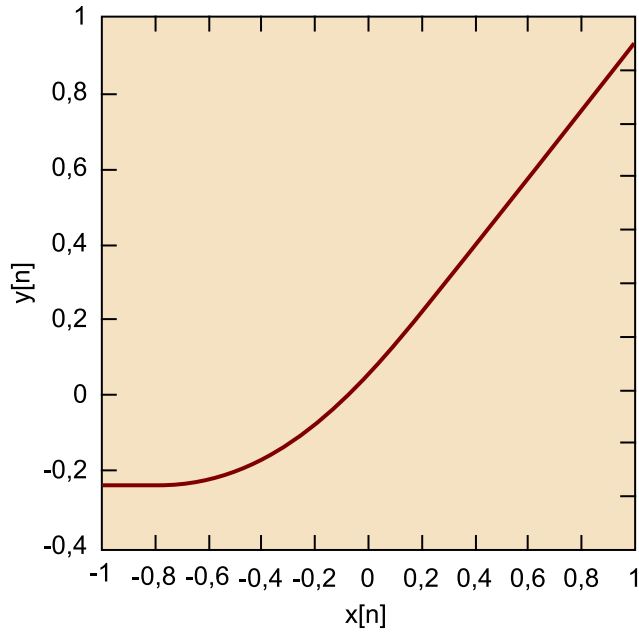


Figura 15. Señal de entrada $x[n]$ (representación superior) y de salida $y[n]$ (representación inferior) en un distorsionador *soft clipping* simétrico

- **Clipping asimétrico.** El *clipping* asimétrico es una función utilizada para simular el comportamiento de los tríodos (o válvulas de tres electrodos) de los amplificadores analógicos. Un posible *clipping* asimétrico es el representado en la figura 16:

Clipping asimétrico



$$y[n] = \frac{x[n] - Q}{1 - e^{-d(x-Q)}} + \frac{Q}{1 - e^{-d(Q)}}$$

Figura 16. Relación entre la señal de entrada $x[n]$ y la señal de salida $y[n]$ para el clipping asimétrico. Para elaborar la gráfica se han utilizado los valores $Q = 0,2$ y $d = 8$.

La figura 17 muestra la salida de este distorsionador cuando se aplica una señal sinusoidal en la entrada:

Soft clipping

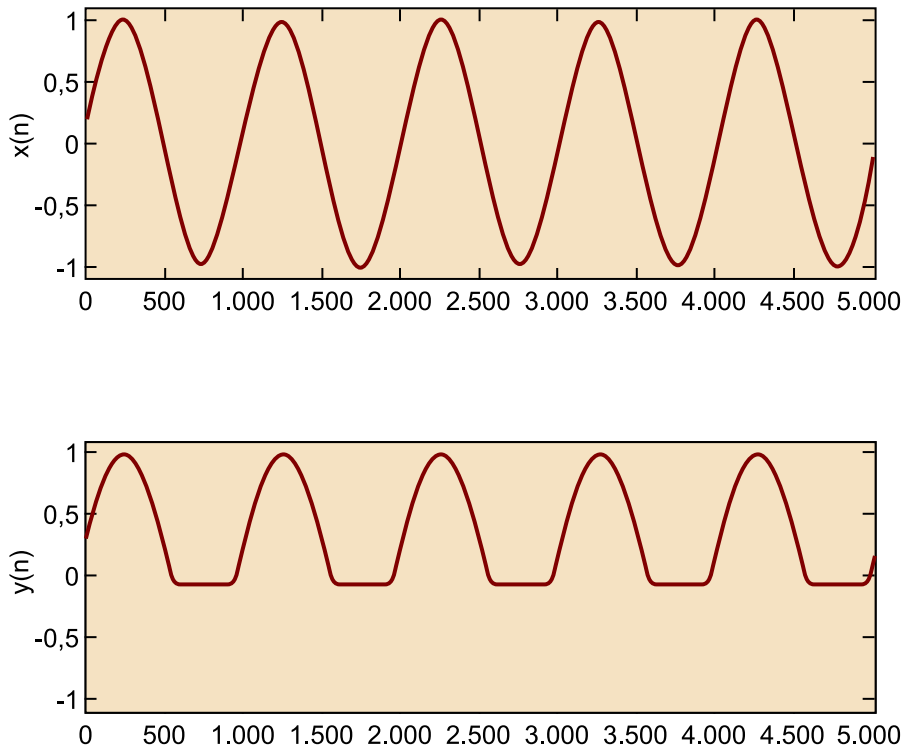


Figura 17. Señal de entrada $x[n]$ (representación superior) y de salida $y[n]$ (representación inferior) en un distorsionador de clipping asimétrico

A continuación, describimos los efectos *overdrive*, distorsión y *fuzz*, generados mediante distorsionadores.

Los términos *overdrive*, *distorsión* y *fuzz* se utilizan para referirse a los efectos de audio empleados sobre todo en guitarras eléctricas, por medio de amplificadores o por medio de pedales de efectos que aportan un sonido más característico de la música moderna.

Los tres efectos modifican la forma de onda del sonido original a partir de un determinado nivel de entrada, de manera menos pronunciada en *overdrive* (utilizando sobre todo ganancias con *soft clipping* simétrico), incrementada en distorsión y máxima en *fuzz* (utilizando sobre todo *clipping* asimétrico). La frontera entre cada uno de los efectos no está predefinida en ningún manual técnico, sino que es una cuestión de estética dependiendo del instrumentista.

El efecto que provoca el *overdrive* se define mayoritariamente como cálido y suave, dado que introduce componentes armónicos en el espectro. En cambio, el efecto *fuzz* introduce componentes inarmónicos y crea un efecto más duro y discordante.

Los efectos de distorsión son característicos de la música *metal* y *grunge*.

5.2. Sistemas no lineales de tipo rectificador de media onda

Un rectificador de media onda es un sistema que en la salida proporciona el valor de las muestras de entrada cuando son positivas, o el valor cero en casos contrario:

$$y[n] = \begin{cases} x[n] & \text{si } x[n] > 0 \\ 0 & \text{si } x[n] \leq 0 \end{cases}$$

Tal como se muestra en la figura 18, si en la entrada de un rectificador de media onda aplicamos una señal sinusoidal, el espectro de salida contendrá no solo la frecuencia de entrada (f_0), sino todas las frecuencias armónicas de orden par (es decir, $2 f_0$, $4 f_0$, etc.):

Ejemplo

Encontraréis un ejemplo de *overdrive* en el vídeo Effects 101: Overdrive.

Rectificador de media onda

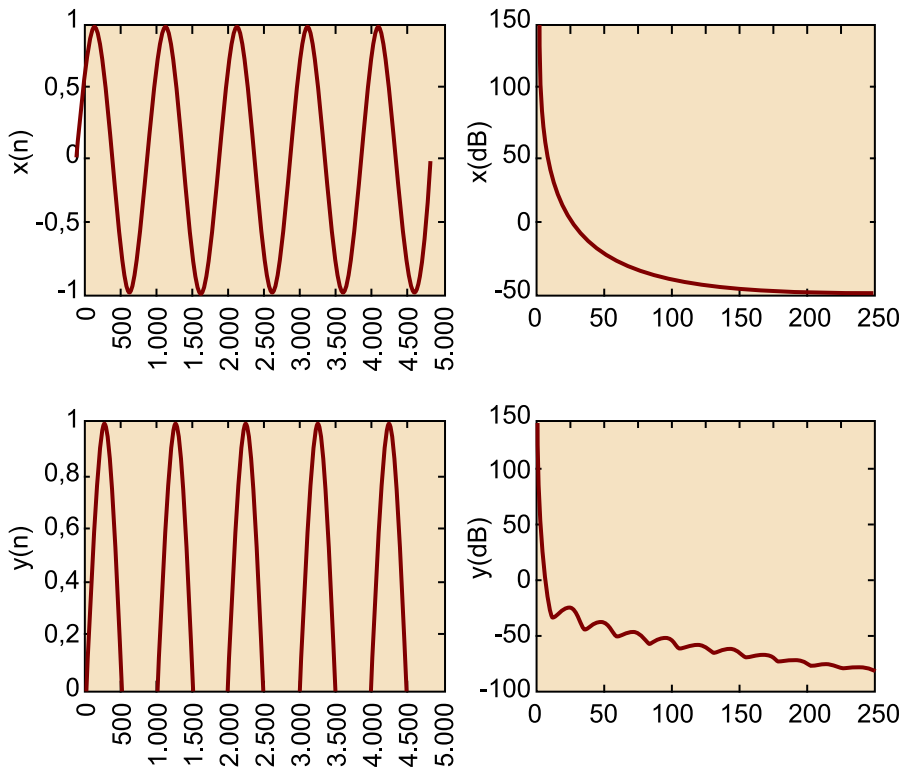


Figura 18. Gráfica superior: señal sinusoidal de entrada (izquierda) y el espectro (derecha). Gráfica inferior: señal de salida de un rectificador de media onda (derecha) y el espectro

A continuación, describimos un efecto generado utilizando rectificadores de media onda, el **efecto octavador**, que consiste en añadir al sonido original armónicos de los tonos originales, simulando que simultáneamente al tono original suena el mismo tono pero en octavas superiores o inferiores. Una aplicación del octavador es realizar solos de guitarras.

Ejemplo

Encontraréis un ejemplo del efecto octavador en el vídeo Effects 101: Octaver.

Los sistemas no lineales modifican la forma de onda de la señal de entrada, introduciendo componentes frecuenciales que no estaban en la señal de entrada.

Un distorsionador es un sistema no lineal basado en un amplificador, en el que la ganancia $g(n)$ depende del nivel de señal de entrada.

Los distorsionadores que se utilizan para crear los efectos *overdrive*, distorsión y *fuzz* aproximan las curvas de ganancia de los amplificadores analógicos que se utilizaban a comienzos de la música moderna.

Los rectificadores de media onda se utilizan para generar el efecto octavador, que consiste en añadir al sonido original armónicos de la señal de entrada.

6. Otros tipos de efectos

En los apartados anteriores hemos recogido los efectos de audio principales que se encuentran en las mesas de mezclas o pedales de efectos comerciales hoy en día. Para completar el módulo, a continuación mencionaremos otros aspectos de la señal que también se pueden modificar para crear nuevos matices del sonido.

Sin embargo, la lista de efectos de audio que contiene el módulo no es completa, dado que es un campo muy extenso y dinámico. La creatividad y la experimentación de los músicos e ingenieros de audio provoca que surjan nuevos efectos o se reinventen nuevos usos para modificaciones de la señal que ya se conocían.

6.1. Efectos espaciales

Cuando escuchamos un audio no solo oímos las características de la señal emitida, sino que la señal se modifica según el medio en el que se propaga. La misma canción escuchada en un concierto al aire libre, dentro de una sala de conciertos o con auriculares suena diferente. Además, distinguimos si el audio nos llega desde delante de nosotros, desde detrás o desde cualquier ángulo de nuestro alrededor.

Los efectos espaciales se basan en las modificaciones que experimenta una señal al propagarse en un lugar concreto y en una dirección concreta. De este modo se crean dos categorías de modificaciones dentro de los efectos espaciales:

- Creación de entornos virtuales de propagación. Las técnicas de creación de entornos virtuales modelan la acústica de un recinto, real o imaginario, de tal manera que se puede modificar cualquier audio para crear el efecto que escuchamos en un punto determinado del recinto. Por ejemplo, podemos modificar una pieza de música para que parezca que la escuchamos en un estadio o dentro de una iglesia.
- Creación de audio 3D. Las técnicas de audio 3D tienen como objetivo modificar las señales para que tengamos la percepción de que nos llega desde un punto concreto del espacio. Por ejemplo, podemos cambiar un audio para obtener la sensación de que nos llega desde la derecha, desde detrás o desde arriba.

Ejemplo

Podéis escuchar un ejemplo de audio 3D en la página de [qsound](#).

El principal campo de aplicación de los efectos espaciales lo encontramos con más frecuencia en la producción audiovisual, a pesar de que también hay ejemplos en la música electrónica.

6.2. Efectos temporales

Los efectos temporales se refieren a toda la familia de efectos cuya finalidad principal es modificar el *tempo* del audio, ya sea de manera uniforme o variable. Los ejemplos más sencillos de efectos temporales son aumentar o disminuir la velocidad de reproducción de un audio.

6.3. Metamorfosis de audio

El término *metamorfosis* o *morphing* se utiliza para referirse a los efectos de audio cuya finalidad es imponer las características de un sonido a otro sonido. Algunos ejemplos de metamorfosis son cambiar el timbre de un instrumento para que suene como otro instrumento o cambiar la voz de una persona para que suene como la de otra.

Las técnicas de metamorfosis se encuentran todavía en fase de investigación, sobre todo en el ámbito del habla, dado que implican cambios profundos en la señal que provocan una pérdida de calidad del audio resultante.

Un efecto de audio es cualquier modificación que se realiza sobre una señal de audio que provoca un cambio en la percepción del sonido.

Actualmente, la modificación del audio de manera digital es una práctica presente en toda la cadena de producción, tanto de música como de material radiofónico y audiovisual profesional.

Los dispositivos o herramientas software que crean efectos de audio ofrecen controles manuales (con opción a automatizarse) para ajustar la intensidad y el efecto creado.

Los efectos de audio se generan a partir de:

- Retardadores (*doubling, slapback, eco, reverberación, flanging, vibrato, chorus*).
- Moduladores (trémolo).
- Sistemas lineales (*wah-wah, phasing*).
- Sistemas no lineales (*overdrive, distorsión, fuzz, octavador*).

La creación de efectos de audio en interpretaciones o producciones musicales o audiovisuales es una tarea que requiere experiencia, y no solo conocimientos técnicos, para producir los efectos queridos.