



PONTIFICIA **UNIVERSIDAD CATÓLICA** DEL PERÚ

Esta obra ha sido publicada bajo la licencia Creative Commons
Reconocimiento-No comercial-Compartir bajo la misma licencia 2.5 Perú.

Para ver una copia de dicha licencia, visite
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

DISEÑO DE UN PROCESADOR DE EFECTOS DE SONIDO EN UN FPGA

Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico, que presenta el bachiller:

Wilber Manuel Morán Carbajal

ASESOR: Andrés Donato Flores Espinoza

Lima, octubre del 2009

RESUMEN

Desde sus inicios el hombre ha mostrado un fuerte interés por los sonidos musicales. Junto a su evolución, la música ha seguido sus pasos desarrollando una consolidada industria encargada de la producción musical, fabricación de instrumentos y equipos en esta línea; con todo ello, se busca preservar las características sonoras de las piezas musicales, pues estas, sirven como modo de identificación de las diferentes regiones, culturas y épocas sociales alrededor del mundo.

Los procesadores de sonido son de uso cotidiano para los músicos en la actualidad ya que forman parte importante en sus composiciones e interpretaciones melódicas. Las tecnologías desarrolladas son diversas (analógicas e híbridos análogo-digital). En nuestro país, el desarrollo de estos equipos se hace con medios analógicos logrando productos costosos, grandes y poco flexibles dado su complejidad de implementación debido a ello se opta por importar equipos para suplir los requerimientos de los músicos. Entonces la implementación de un sistema dinámico, flexible y portátil para el procesamiento de sonido sería de gran ayuda para el músico pudiendo generar efectos a la señal sonora y lograr el estilo que él requiere.

El presente trabajo está desarrollado en cuatro capítulos: En el primer capítulo se analiza la problemática en torno a los procesadores de sonido y su interacción con el músico. En el segundo capítulo, se muestra el estado actual de la tecnología sobre los sistemas de procesamiento de sonido, se define los conceptos físicos y característicos de las señales sonoras, además, se realiza un estudio de la tecnología FPGA a utilizar para el desarrollo del sistema. En el tercer capítulo, se muestra todo el procedimiento y metodología seguida para simulación e implementación así como los algoritmos y efectos elegidos: *delay*, *delay* cruzado, *flanger* y reverberación. Finalmente en el cuarto capítulo, se hace la evaluación del sistema, para ello se definen dos criterios de evaluación: analítico y subjetivo, que permiten cuantificar y validar el sistema.

Como conclusión principal se recoge que el sistema tiene una aprobación significativa y en especial el algoritmo de efecto *delay* cruzado que alcanza un 90% de aprobación por los músicos involucrados en las pruebas. Finalmente se puede concluir que el sistema si es realizable en base a la tecnología usada.

«Todo cuanto vibra hace música. La música que perciben los hombres es música humana; la música de los átomos, de las estrellas, de los animales, para que los hombres puedan percibirla, debe ser transformada. »

Karlheinz Stockhausen

«Como tal, la música sólo existe en nuestros nervios auditivos y en nuestro cerebro: externamente, la música consiste en meras relaciones numéricas, es decir, en primer lugar, según su cantidad, con relación al tacto; luego, según la cualidad, con relación a los grados de la escala tonal; por tanto, tanto en su elemento rítmico como en el armónico.»

Friedrich Nietzsche

A María, mi madre, que me apoyo todos estos años, por su infinito amor, cariño y comprensión. Por soportar tantos años lejos de ella, por estar a mi lado en los buenos y malos momentos.

A Celamir, mi padre, gracias a su influencia para poder seguir esta carrera, por su apoyo moral y su formación profesional que me sirvió de ejemplo todos estos años.

A Isela, hermana y madre, gracias a sus consejos que me han hecho mejor persona, por su infinito apoyo y confianza. Deuda que nunca podré pagar.

A Sughey, Jenny, Vasny, mis hermanos, por su comprensión y apoyo respetando mis ideales, por todo el tiempo que no estuve con ellos.

A Axel, mi sobrino por no estar junto a él en todas sus aventuras y por ser la fuente de muchas ideas durante toda mi carrera.

Al Ingeniero Andrés Flores Espinoza, por su paciencia y consejos en la realización de este trabajo.

Al Ingeniero Pedro Crisóstomo Romero, por su apoyo incondicional para que este desarrollo sea posible.

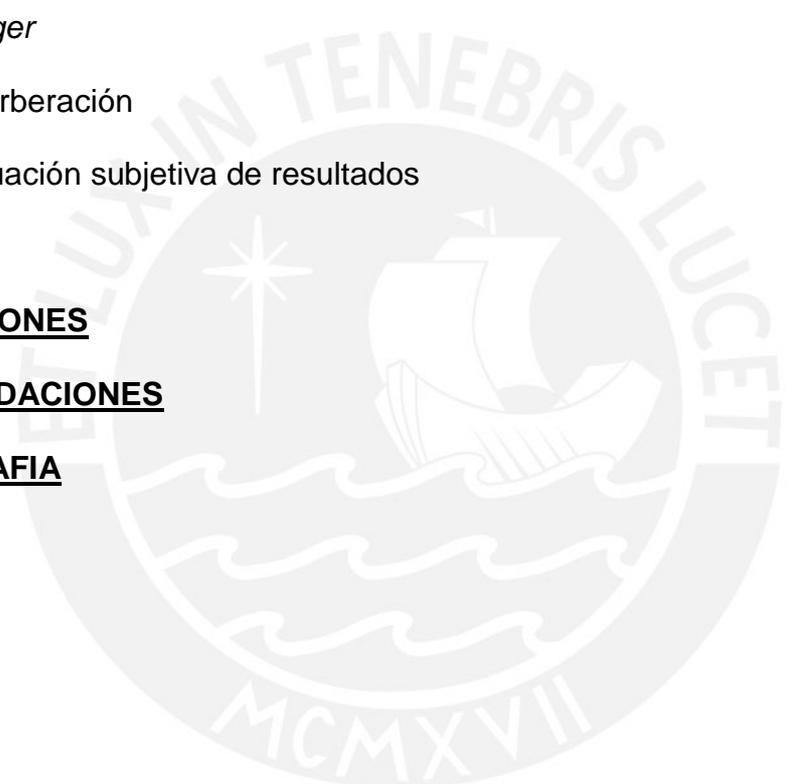
A Daniel Salvador y a Ecos, por su amistad y todo lo que me han enseñado de sonido.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	8
<u>CAPÍTULO 1</u>	10
1. LOS SISTEMAS DE PROCESAMIENTO DE SONIDO Y SU PROBLEMÁTICA	10
1.1. Variables del medio general	10
a) Sociedad	10
b) Potencialidades	10
c) Actuación	11
1.1.1. Requerimiento de sistemas digitales para el procesamiento de sonido	11
1.2. Variables del medio específico	12
1.2.1. Mercado mundial y nacional de consumo y producción de equipos de sonido	12
1.2.2. Clientes potenciales estudios de grabación y profesionales del área	12
1.2.3. Procesamiento analógico de sonido	12
1.2.4. Personal especializado para el manejo de equipos analógicos	13
1.3. Declaración del marco problemático	13
<u>CAPÍTULO 2</u>	14
2. TECNOLOGIAS UTILIZADAS PARA EL SISTEMA DE PROCESAMIENTO DE SONIDO	14
2.1. Estado del Arte	14
2.1.1. Evolución de los sistemas de procesamiento de sonido	15
a) Desarrollos actuales	15

b) Estado actual de la industria de audio	17
2.2. FPGA	23
2.2.1. Desempeño de los FPGA frente a los DSP	23
2.3. Modelo físico acústico	25
2.4. Síntesis sobre el asunto de estudio	26
2.5. Modelo teórico	28
<u>CAPÍTULO 3</u>	31
3. DISEÑO DE LOS EFECTOS DE SONIDO	31
3.1. Sistema a implementar	31
3.1.1. Audio codec AC97	34
3.1.2. Diseño del sistema interno en el FPGA	36
3.2. Efectos basados en líneas de retardo	36
3.2.1. <i>Delay</i>	37
3.2.1.1. Principio y modelado	37
3.2.1.2. Simulación e implementación	39
3.2.1.2.1. Simulación	39
3.2.1.2.2. Implementación	40
3.2.2. <i>Delay</i> cruzado	42
3.2.2.1. Implementación	43
3.2.3. <i>Flanger</i>	44
3.2.3.1. Principio y modelado	44
3.2.3.2. Simulación	47
3.2.4. Reverberación	48
3.2.4.1. Principio y modelado	48

3.2.4.2. Implementación	52
<u>CAPÍTULO 4</u>	55
4. EVALUACIÓN DE RESULTADOS	55
4.1. Evaluación analítica de resultados	55
4.1.1. <i>Delay</i>	55
4.1.2. <i>Delay</i> cruzado	58
4.1.3. <i>Flanger</i>	61
4.1.4. Reverberación	63
4.2. Evaluación subjetiva de resultados	65
<u>CONCLUSIONES</u>	71
<u>RECOMENDACIONES</u>	73
<u>BIBLIOGRAFIA</u>	74
<u>ANEXOS</u>	79



INTRODUCCIÓN

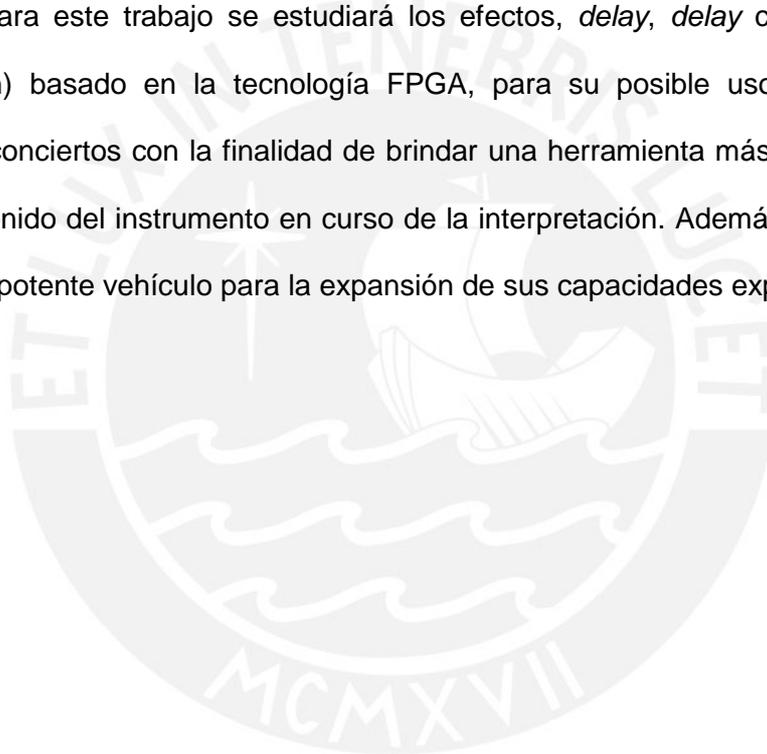
En la industria de audio los efectos sonoros son usados muy habitualmente, estos pueden ser creados por equipos analógicos o digitales. Actualmente, los equipos digitales van a la vanguardia en tecnología de audio a comparación de sus antecesores analógicos. Debido a la competitividad del mercado musical la investigación, implementación y estudio de algoritmos tienen un grado de secretismo, el mayor desarrollo lo hacen las empresas privadas (Lexicon, Behringer, TC Electronic, Yamaha entre otras) teniendo toda la documentación de los desarrollos en esta área, por ejemplo, Lexicon es el creador de la reverberación universal aceptado por la Sociedad de Ingeniería de Audio (AES por sus siglas en inglés) [1] [2].

Por otro lado, en los últimos años las técnicas de procesamiento digital de señales (DSP por sus siglas) están cobrando gran importancia, técnicas que no son recientes (los primeros estudios datan de los años 50 y 60) su utilidad sólo pudo hacerse manifiesta a raíz de la aparición de procesadores digitales lo suficientemente rápidos y potentes para poder implementar los algoritmos de tratamiento de señales de forma económica y eficazmente rentable. Con la aparición en los años 80 de los DSPs (Digital Signal Processors) la revolución en esta área se incrementó junto con sus desarrollos. Como apoyo al DSP se presenta el FPGA (Field Programmable Gate Array) que hace su aparición en el año de 1984 (inventado por Ross Freeman, co-fundador de Xilinx) con el cual se puede hacer procesamiento en paralelo y logrando mejores resultados que su antecesor el DSP (estudio realizado en el Instituto Nacional de Astrofísica, óptica y electrónica - INAOE) [3] [4].

De esta manera y en el contexto anteriormente citado, el presente trabajo tiene como hipótesis principal mostrar un posible desarrollo en esta área ya que en el Perú los sistemas de procesamiento de sonido se hacen (en su mayoría) con medios analógicos,

lo que constituye sistemas complejos, de gran tamaño y con limitaciones debido a los componentes que usan para su implementación. El desarrollo de un sistema digital basado en la tecnología FPGA que implemente efectos de sonido, para con ello lograr un sistema versátil, compacto y flexible que sería de gran ayuda para el músico en sus creaciones. Además, de proporcionar información para desarrollos futuros en el área del procesamiento de sonido y que no esté sujeta a las empresas privadas.

El objetivo del siguiente trabajo es diseñar un sistema de procesamiento digital de efectos de sonido (para este trabajo se estudiará los efectos, *delay*, *delay* cruzado, *flanger* y reverberación) basado en la tecnología FPGA, para su posible uso en estudios de grabación y conciertos con la finalidad de brindar una herramienta más eficiente y lograr cambiar el sonido del instrumento en curso de la interpretación. Además de proporcionar al músico un potente vehículo para la expansión de sus capacidades expresivas.



CAPÍTULO 1

1. LOS SISTEMAS DE PROCESAMIENTO DE SONIDO Y SU PROBLEMÁTICA

1.1. Variables del medio general

a) Sociedad

Desde el inicio de la civilización el hombre ha mostrado un fuerte interés por los sonidos musicales, muchos de los cuales, son característicos de las culturas antiguas y actuales. La música es usada con fines terapéuticos, religiosos, de relajación, de disfrute entre otros.

Junto a la evolución del hombre la música ha seguido sus pasos desarrollando una consolidada industria encargada de la producción musical así como la fabricación de instrumentos y equipos en esta línea; con todo ello se busca preservar las características sonoras de las piezas musicales, pues éstas, sirven como modo de identificación de las diferentes regiones, ámbitos y épocas sociales alrededor del mundo [5] [6] [7].

b) Potencialidades

Es notable la influencia de la música en la sociedad, debido a ello los desarrollos tecnológicos se han incrementado (se ha evolucionado de lo analógico a lo digital), buscando ayudar al músico a variar entre las diferentes tendencias musicales, producir

nuevos estilos y crear sonidos para ser usados en sus composiciones, en síntesis se quiere desarrollar una herramienta de gran ayuda para las creaciones musicales [6] [23].

c) Actuación

Viendo la necesidad que tienen los músicos por mejorar la calidad del sonido, mantener sus melodías predefinidas, la imposibilidad de generar la misma calidad de sonido en conciertos como la realizada en un estudio de grabación, y a todo ello, superar las limitaciones de los equipos, sería de gran ayuda contar con un equipo para realizar el filtrado tratamiento del las señales sonoras [6].

Se requiere un sistema dinámico, flexible y portátil que pueda ser usado en conciertos o en estudios de grabación sin necesidad mover gran una cantidad de equipos mejorando así la calidad y fidelidad del sonido en vivo.

1.1.1. Requerimiento de sistemas digitales para el procesamiento de sonido

En la actualidad mundial hay un creciente desarrollo en el campo digital musical en este contexto, se ve en la necesidad de migrar de lo analógico a lo digital, esto implica un cambio en la concepción del procesamiento de las señales analógicas para llegar al tratamiento digital y lograr obtener la calidad de sonido que se obtiene con las técnicas antecesoras.

Con un tratamiento digital de sonido se superan las limitaciones impuestas por el canal con un mejor muestreo y cuantización, además la influencia del ruido es menor y la recuperación de las señales sonoras se hace más eficiente [8].

1.2. Variables del medio específico

1.2.1. Mercado mundial y nacional de consumo y producción de equipos de sonido

En la actualidad el desarrollo de las aplicaciones musicales son diversas y se van incrementando a medida que la industria lo requiera, se tienen empresas dedicadas que promocionan equipos para estudios de grabación, conciertos, músicos aficionados, efectos de voz y efectos para instrumentos musicales [9]. En nuestro país se opta por importar equipos para realizar el tratamiento de las señales sonoras debido al poco desarrollo tecnológico musical nacional lo cual complica la creación de los músicos al no poder acceder al costo de estos equipos.

1.2.2. Clientes potenciales estudios de grabación y profesionales del área

Debido a los diferentes géneros y formas de interpretar una pieza musical se necesitan equipos con diferentes características y funciones, estos son requeridos por estudios de grabación, para realizar procesos de masterización (proceso que trata de estandarizar el sonido de cualquier grabación para que pueda ser reproducido en cualquier equipo de sonido conservando la misma cualidad sonora), secuenciación y edición agregando efectos al sonido; músicos, para sus diferentes creaciones e interpretaciones; auditorios, en los cuales se hace una distribución de equipos dependiendo de la infraestructura del lugar; conciertos, equipos modulares para poder obtener la misma calidad de sonido tanto en vivo como en estudio.

1.2.3. Procesamiento analógico de sonido

Si bien el desarrollo es significativo, en el campo del procesamiento de sonido, cabe resaltar que en su mayoría se ha desarrollado de forma analógica, y dadas las

características físicas y electrónicas de los componentes, los equipos son complejos y de gran dimensión lo que dificulta los desarrollos musicales pero ofrecen fidelidad y robustez [10].

1.2.4. Personal especializado para el manejo de equipos analógicos

Debido a la compleja implementación de los equipos analógicos, estos requieren personal especializado para su operación dado que requieren conocimientos de los diferentes parámetros y componentes que tienen que modificar para su óptimo funcionamiento, esto hace tedioso el trabajo de los músicos que tienen que depender de los especialistas para interpretar sus creaciones [1]. Un equipo modular, versátil, amigable y fácil de operar ayudaría a superar las limitaciones y facilitar las creaciones e interpretaciones de los músicos.

1.3. Declaración del marco problemático

Los procesadores de sonido son de uso cotidiano para los músicos en la actualidad ya sea para su práctica como en estudios de grabación y conciertos. En nuestro país, el desarrollo de estos equipos se hace con medios analógicos logrando productos costosos, grandes y poco flexibles dado su complejidad de implementación.

Debido a la necesidad que se tiene para procesar el sonido se opta por importar equipos para suplir los requerimientos musicales dado al poco desarrollo de la industria nacional en esta área. Sumado a esto, se tiene la necesidad del músico para interpretar sus melodías y que los equipos no sean los limitantes para poder transmitir el mensaje que llevan sus composiciones además el afán de cada autor en realizar sus creaciones con sonidos característicos logrando un estilo que lo diferencia entre los demás [8].

CAPÍTULO 2

2. TECNOLOGIAS UTILIZADAS PARA EL SISTEMA DE PROCESAMIENTO DE SONIDO

2.1. Estado del Arte

Desde sus inicios el hombre ha mostrado un fuerte interés por los sonidos musicales, con el uso la nueva tecnología se busca mejorar la forma de generar y tratar el sonido. En los últimos años y con los avances tecnológicos del mundo digital se tiene la necesidad de migrar de lo analógico a lo digital, con la finalidad de lograr mejor rendimiento y hacer equipos más compactos para las diferentes aplicaciones sonoras [6] [7].

El presente estudio se orienta al diseño de hardware especializado en FPGA para el procesamiento de sonido, ya sea para su reproducción o para su actuación durante la interpretación de una pieza musical, mejorando la calidad del sonido por medio del procesamiento y filtrado de la señal además, de ayudar al músico a variar las diferentes tendencias musicales con ayuda de los efectos que el equipo posee y producir nuevos estilos y sonidos para ser usados en sus composiciones.

¿Una palabra para cada sonido, y un sonido para cada palabra? [6] desde la antigüedad se usa la música como lenguaje que sin importar el idioma lleve un mensaje, teniendo en cuenta esta premisa, se desea reproducir una pieza musical similar a la original, por ello se requiere desarrollar equipos óptimos, compactos y flexibles. Se busca mantener las

características más relevantes de la señal musical como son la armonía, el ritmo y melodía dentro de los aspectos tonales. O su interpretación en concierto dentro del aspecto tímbrico dado que es importante que una pieza musical cuente con estos aspectos bien definidos [6] [7].

A lo anterior mencionado, se suma la necesidad de empresarios nacionales de ver la factibilidad de migrar de lo analógico a lo digital en el campo del procesamiento y síntesis de sonido. Dentro de este contexto, el tratamiento de sonido se realizará en una tarjeta de desarrollo con un FPGA debido a las prestaciones y facilidad con la que en ellas se puede implementar arreglo de filtros y osciladores digitales que a su vez están compuestos por multiplicadores, sumadores y acumuladores; por otro lado se hace uso de software especializado para el desarrollo de las aplicaciones como son el ISE de XILINX y la interfaz que ofrece en Matlab/Simulink System Generator for DSP [11].

2.1.1. Evolución de los sistemas de procesamiento de sonido

El desarrollo de nuevos instrumentos, búsqueda de sonidos y requerimientos musicales vienen impulsando el desarrollo en el campo digital orientado al sonido en este contexto, se ve la necesidad de migrar del desarrollo analógico al digital lo que implica un estudio de nuevas técnicas de procesamiento de las señales para poder lograr la calidad que se obtiene con equipos analógicos [7] [10].

a) Desarrollos actuales

Las tecnologías desarrolladas son diversas (analógicas e híbridos analógicos - digitales) y para diferentes aplicaciones como procesadores dinámicos, de efectos de sonidos, audio, voz, sintetizadores de sonido para conciertos, teatros, cine, etc. Existen empresas dedicadas como Yamaha, Alesis, Behringer, Das, TC-Electronic, TC-Helion, Zoom, Fostex,

Digitech, ToneWork, Boss, Corp, Zebranalogic (empresa peruana), entre otras promocionan equipos para estudios de grabación, conciertos, músicos aficionados, efectos de voz, efectos para instrumentos musicales, etc [9] [12]. En la implementación de estos equipos se hacen uso de filtros y osciladores para realizar la generación de nuevos sonidos, los cuales son logrados variando los coeficientes de los filtros, logrando así implementar diversos efectos como distorsión, eco, *delay*, *chorus*, *flanger*, *wah*, *phaser*, trémolo, etc (ver capítulo 3) [15]; además incorporan funciones en base a filtros que simulan escenarios acústicos como catedral, teatro, concierto, sala o estudio. Si bien el desarrollo es significativo, cabe resaltar que en su mayoría se desarrolla de forma analógica y en el campo digital se usa circuitos integrados DSPs (*Digital Signal Processors*) [13] [14].

Con la finalidad de hacer equipos más compactos y lograr mejores prestaciones se comenzó a usar circuitos integrados DSPs que son procesadores específicos para el procesamiento de señales (en este caso de audio) usados con la finalidad de hacer equipos más compactos y lograr mejores prestaciones. Estos sistemas incluyen a menudo algoritmos de procesamiento de señales como filtros FIR (*Finite Impulse Response*), IIR (*Infinite Impulse Response*), FFT (*Fast Fourier Transform*), entre otros además pueden configurarse para diferentes frecuencias de muestreo tales como 22050, 44100, 48000, 96000 Hz las más comerciales [1] [15] [16].

Con el avance tecnológico y haciendo uso de la novedosa tecnología de FPGA (*Field Programmable Gate Array*), circuito integrado que es un arreglo de componentes lógicos, es decir, presentan una estructura flexible en la cual cada elemento puede ser programado de forma óptima para lograr la implementación del algoritmo deseado, logrando implementar la estructura lógica más óptima para alcanzar un máximo rendimiento durante el proceso que va a realizar [4].

b) Estado actual de la industria de audio

Siguiendo a las primeras invenciones de instrumentos electrónicos como el *Theremin* (unos de los primeros instrumentos musicales electrónicos que consiste en una caja con dos antenas que se ejecuta acercando y alejando la mano de cada antena sin tocarlas) y el *Mellotron* (instrumento musical polifónico se trata de un teclado capaz de reproducir tres canales de cintas pregrabadas accionadas con las manos, fue uno de los primeros teclados electrónicos), aparecieron equipos de transducción y procesamiento de señales de audio, los cuales han ido mejorando junto con la rápida evolución de la tecnología, tanto en capacidad de procesamiento como en fidelidad de sonido. Entre ellos tenemos micrófonos, parlantes, amplificadores, procesadores, ecualizadores, sintetizadores y mezcladoras [8] [17].

A continuación se presentan algunos modelos representativos de procesadores de efectos:

- **Behringer MULTICOM PRO-XL MDX4600**



Figura 2.1. MULTICOM PRO-XL MDX4600 [12]

Expansor/puerta de ruido/compresor/limitador de picos interactivo de 4 canales con realce dinámico de sonido y filtro de bajo contorno. 4 canales de control dinámico de primera clase en un solo rack. Avanzado expansor/puerta de programa adaptable, medición extensa. Variedad de opciones de configuración [12] [17].

Tabla 2.1. Especificaciones MULTICOM PRO-XL MDX4600

Especificaciones	<p>Generales BW: 20Hz – 20KHz +0/-0.5 dB Rango de frecuencias: 0.35Hz – 200KHz, +0/-0.3 dB S/N: 115 dB</p> <p>Expansor/compuerta Tipo: IRC (interactive ratio control) Umbral: Variable (OFF - +10dB) Ratio: Variable (1:1- 1:8) Realce: Variable, slow 100 ms/1dB, fast 100 ms/100dB</p> <p>Compresor Tipo: IKA (Interactive knee adaptation) Umbral: Variable (-40 - +20dB) Ratio: Variable (1:1- 00:1) Realce: Variable (manual y automático)</p> <p>Limitador de picos Tipo: IGC (Interactive gain control) Umbral: Variable (0 – OFF(+21dBu)) Ratio: Variable (00:1)</p> <p>Dinámica Tipo: IDE (Interactive dynamic enhancer) Filtro: 2.5 KHz (Low cut – off frequency) Característica: filtro pasa alto (6 dB/oct)</p> <p>Suministro: 100 – 120 V ~, 200 – 240 V ~, 50 – 60 Hz Consumo: max. 18 W</p>
Precio	USD\$ 845.99

- Behringer ULTRAMIZER PRO DSP1424P



Figura 2.2. ULTRAMIZER PRO DSP1424P [12]

Maximizador de intensidad multibanda digital de 24-bits / realzador de programa.
 Procesador DSP para compresión y limitación multi-banda de frecuencias bajas y altas.
 Cambio absolutamente “inaudible”. Permite aumentar la intensidad de grabación o doblar

la intensidad sin aumentar la potencia del amplificador. El limitador de picos protege el equipo contra truncamientos y niveles de sonido peligrosos. El procesador estéreo de sonido 3D incorporado proporciona una increíble mejora espacial así como una imagen estéreo perfeccionada, dando a las mezclas el muy buscado “brillo” extra, mientras que el sistema de reducción de ruidos mantiene todas las cosas limpias [12].

Tabla 2.2. Especificaciones ULTRAMIZER PRO DSP1424P

Especificaciones	<p>Generales Tipo: filtrado RF, entrada servo balanceada Impedancia: 60 kOhmios balanceada, 30 kOhmios debalanceada</p> <p>Operación nominal Max. nivel de entrada: 10 dBV - +4 dBu (switch) +16 dBu - +4 dBu Rango de frecuencias: 20 – 200KHz +0/-0.3 dB Ruido: >94 dB Interface: MIDI 5-pin socket</p> <p>DSP Convertidor de 24 bits sigma-delta 64/ 128 times oversampling Tasa de muestreo: 46.875 KHz</p> <p>Suministro Voltage: 100 – 120 V ~, 200 – 240 V ~, 50 – 60 Hz Consumo: max. 10 W Conexiones: estándar IEC</p>
Precio	USD\$ 1245.00

- Behringer V-VERB PRO REV2496



Figura 2.3. V-VERB PRO REV2496 [12]

Modelador de reverberación con procesador dual de 24 bits/96 kHz [12].

Tabla 2.3. Especificaciones V-VERB PRO REV2496

Especificaciones	<p>General BW: 20Hz – 20KHz +0/-0.5 dB Rango de frecuencias: 10 Hz – 20 kHz @ 44.1 kHz, 10 Hz – 22 kHz @ 48 kHz, 10 Hz – 46 kHz @ 92 kHz S/N: -90 dBu Rango dinámico EA-SA: 106 dB</p> <p>Midi Tipo: 5-pin DIN jacks E/S/Thru Implementation : <i>Midi implementation chart</i></p> <p>DSP Procesador: SHARC DSP 600 MFLOPs 32-bits Convertidor: 24 bit/96 kHz Tasa de muestreo externa: 44.1, 48, 96 kHz Memoria: Preset 100 Rom + 100 Display: 128 x 64 crystal display (verde)</p> <p>Suministro Voltage: 85 – 250 v ~, 50 – 60 Hz Consumo 10 W</p>
Precio	USD\$ 756.00

- Behringer VIRTUALIZER PRO DSP2024P



Figura 2.4. VIRTUALIZER PRO DSP2024P [12]

Procesador digital multiefectos de 24 bits con motor de audio dual. 71 algoritmos nuevos de efectos de modulación, simulación de amplificador, distorsión y efectos especiales, así como procesamiento dinámico y psicoacústico efectivo y ecualización algoritmos de reverberación. 7 parámetros ajustables, ecualización alta y baja, 11 combinaciones de efecto en serie o paralelo, procesamiento estéreo verdadero. Interfaz de usuario mejorada [12].

Tabla 2.4. Especificaciones VIRTUALIZER PRO DSP2024P

Especificaciones	<p>Entradas de audio Conexión: enchufe hembra de 6.3 mm stereo Impedancia: 80 k ohms Nivel de entrada nominal: -10dBV a +4 dBu (ajustable)</p> <p>General BW: 20Hz – 20KHz +0/-3 dB S/N: 91 dB no ponderado, 20 Hz a 20 kHz Diafonía: <-76 dB</p> <p>Midi Tipo: conector Din de 5 polos</p> <p>DSP Convertidor: 24 bit Signal-delta, 64/96 kHz Frecuencia de muestreo: 46.875 kHz</p> <p>Suministro Voltage: 120 V – 230 V ~, 50 – 60 Hz Consumo: 15 W</p>
Precio	USD\$ 984.00

- **YAMAHA SPX2000**

El SPX2000 es una nueva generación de equipos acorde con las nuevas mesas digitales de producción serie DM, y son perfectos para una gran gama de aplicaciones, desde directos a estudios de producción, donde es necesario disponer de unos procesadores de efecto de calidad profesional [14].

Tabla 2.5. Especificaciones SPX2000

Especificaciones	<p>Procesador multiefectos profesional, Tasa de muestreo 96kHz Algoritmo de reverberación “REV-X”</p> <p>Midi Tipo: conector Din de 5 polos</p> <p>DSP Convertidor: 24 bit Signal-delta, 64/96 kHz Frecuencia de muestreo: 46.875 kHz</p> <p>Suministro Voltage: 120 V – 230 V ~, 50 – 60 Hz Consumo: 10 W</p>
Precio	USD\$ 1350.00



Figura 2.5. SPX2000 [14]

- **TC-ELECTRONIC M4000**

La búsqueda de profundidad, precisión, amplitud espacial y carácter es una cuestión de vital importancia en la producción musical. Reverb 4000 representa para el estudio profesional la reverberación y la profundidad espacial definitivas, además de un complemento perfecto para cualquier consola de mezcla profesional [17].



Figura 2.6. SPX2000 [17]

Tabla 2.6. Especificaciones TC-ELECTRONIC M4000

<p>Especificaciones</p>	<p>Resolución 24 bit. Tasa de muestreo 96 kHz.</p> <p>Incluye reverberadores System6000 y M5000. Controlable con el software TC ICON (PC/MAC) incluido via USB.</p> <p>E/S XLR Balanceada, ADAT, SPIDF, AES/EBU y MIDI.</p> <p>Reverberadores estéreo y presets del System 6000 y de la M5000.</p> <p>Suministro Voltage: 120 V – 230 V ~, 50 – 60 Hz Consumo: 15 W</p>
<p>Precio</p>	<p>USD\$ 1680.00</p>

2.2. FPGA

Los FPGAs (*Field Programmable Gate Array*) son dispositivos integrados semiconductores que contienen bloques lógicos cuya interconexión y funcionamiento se puede programar, su configuración se lleva a cabo en base a lenguajes de programación de alto nivel o mediante sistemas de bloques con interfase Matlab/Simulink como *System Generator* (Xilinx) los cuales son trasladados al FPGA. El proceso se basa en conectar estratégicamente los bloques lógicos configurables (CLBs) para realizar las funciones deseadas, la flexibilidad de interconexión de estos bloques es la razón por la que se consiguen diseños de gran complejidad y con arquitecturas que brindan gran rendimiento haciendo del FPGA óptimo para las tareas de procesamiento [4] [11] [18].

2.2.1. Desempeño de los FPGA frente a los DSP.

Los FPGAs y DSPs, si son usados para la síntesis y procesamiento de sonido, presentan grandes ventajas ante sus antecesores analógicos; se necesita procesar filtros y osciladores por el proceso de división de tiempo, este requiere de multiplicadores que sean especiales para la multiplicación con coeficientes constantes y gran ancho de banda para cargar de la memoria los datos y coeficientes para los osciladores y filtros que bien pueden estar guardados en memoria o ser datos de entrada [3] [17] [25].

Según el artículo "*A Music Synthesizer on FPGA*" [3] para las tareas de procesamiento de sonido se usan filtros digitales los cuales constan de multiplicaciones, sumas y acumulaciones de datos para lo cual se prueba el funcionamiento máximo del FPGA y DSP para las operaciones requeridas con 16 bits, la puesta en práctica de las aplicaciones se realizaron en Xilinx Virtex FPGA y dos series de DSP donde uno es más rápido que otro (ver Tabla 2.7).

Tabla 2.7. Funcionamiento máximo de FPGAs y DSPs (en MIPS)

FPGA (Xilinx Virtex)	1390 (XCV1000)	5570 (XCV4000E)
DSP (TI TMS320C6000)	1200 (300MHz)	4400 (1100MHz)
DSP (Motorola)	1200 (MSC8101)	4800 (MSC8102)

Según los resultados obtenidos el funcionamiento al máximo de estos dispositivos son casi comparables, esto se debe a que los DSPs se diseñan para muchos usos y no se especializan en operaciones de multiplicación, suma y acumulación; a comparación del FPGA que puede enfocar todos sus recursos de hardware para las operaciones requeridas y lograr superar a los DSPs en tiempo de procesamiento [3].

El uso de FPGAs permite la implementación de sistemas tan complejos como microprocesadores o sistemas en un solo circuito integrado, el costo de desarrollo es relativamente bajo, no depende de una fábrica de semiconductores para desarrollar la aplicación en un circuito integrado el diseño con FPGA es rápido, didáctico y eficiente. Se hace uso de software especializados como el ISE de Xilinx, Quartus de Altera entre los más conocidos el primero, ofrece una forma didáctica de programar sus productos haciendo uso del *System Generator* con la interfaz Matlab/Simulink, además hace uso del lenguaje VHDL (*Very High Speed Integrated Circuits Hardware Description Language*) para la implementación de las aplicaciones [11] [18]. El diseño se puede trasladar a un ASIC (*Application-Specific Integrated Circuit*) si la demanda lo requiere. Los FPGAs están sustituyendo a los arreglos de compuertas y a algunos ASIC debido a sus ventajas y gran potencial de desarrollo tecnológico, además, da la posibilidad de integrar partes digitales y analógicas; por otro lado, cuentan con mayores frecuencias de operación que los DSPs y pueden reprogramarse con facilidad.

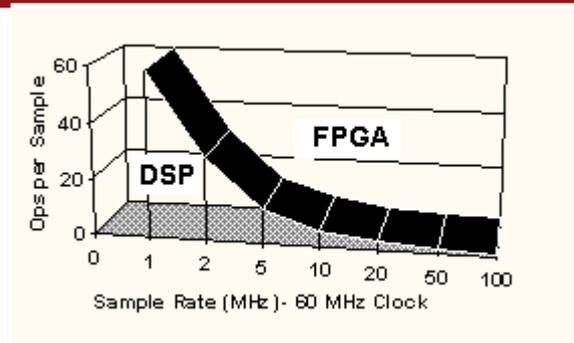


Figura 2.7. El rendimiento del DSP está limitado por el flujo secuencial de las instrucciones. Los FPGAs son una mejor solución en la región por encima de la curva gracias a su procesamiento paralelo.

Fuente: INAOE

Según *Arias Estrada Miguel* y de acuerdo a los estudios realizados en el INAOE (Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica), los FPGAs son de 10 a 1000 veces más rápidos que un DSP este funcionamiento se puede alcanzar completamente utilizando la flexibilidad del FPGAs que supera al DSPs (Figura 2.7) [4] [13].

2.3. Modelo físico acústico

El cambio que implica dejar la fidelidad que ofrecen las técnicas analógicas y pasar a lo digital, trae consigo una serie de inconvenientes como qué hacer para conservar toda la información que contiene una pieza musical para ello se hace uso de las bases físicas para proporcionar un modelo de la acústica que se tiene en un instrumento musical [19].

Es necesario recurrir a una rama de la psicofísica conocida como psicoacústica (se conoce desde 1924) que estudia la relación entre las propiedades físicas del sonido y la interpretación que hacen de ellas el cerebro. Con base en ésta teoría se tiene el principio de enmascaramiento de bandas críticas, el oído no puede percibir dentro de una banda crítica componentes de frecuencia de menor energía cercanas a una frecuencia de energía más elevada (frecuencia enmascaradora) por estar fuera del rango de audición.

Por tanto ciertas componentes de frecuencia admiten más ruido del tolerable y requieren menos bits para ser codificadas. Todo ello ha permitido el desarrollo de variados algoritmos de compresión: MP3, MPEG, MPEG-1, etc. En consecuencia se tiene ahorro en capacidad de almacenamiento (Figura 2.8) [16] [19] [20].

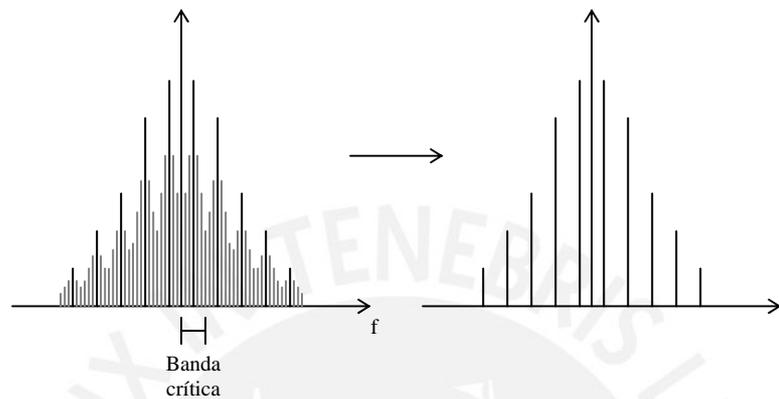


Figura 2.8. Enmascaramiento

Las técnicas basadas en el modelado físico posibilitan el auge de una nueva clase de instrumentos electrónicos digitales dotándolos de nuevos sonidos con mayor definición, ganancia y agradable para el auditorio. Con estos modelos se puede tratar la señal de sonido y audio controlando sus parámetros como la frecuencia fundamental y la dispersión en tiempo real que pueden ser aplicadas para la síntesis de diferentes instrumentos musicales [19] [21].

Se puede modelar las diferentes funciones y filtros para poder lograr el efecto deseado sin perder la naturalidad del sonido que se quiere procesar.

2.4. Síntesis sobre el asunto de estudio

Es notable la influencia de la música en nuestra vida diaria ya sea como método terapéutico, relajación o simplemente disfrutar de una pieza musical [5]; el desarrollo de

equipos para mejorar la calidad del sonido y lograr las sensaciones esperadas se ve respaldada por la gran industria sonora musical.

Viendo la necesidad que tienen los músicos por mejorar la calidad del sonido, mantener sus melodías predefinidas, la imposibilidad de generar la misma calidad de sonido en conciertos, como la realizada en un estudio de grabación; y a todo esto, superar las limitaciones de los equipos y el ruido que se suma al sonido, sería de gran ayuda contar con un equipo para realizar el filtrado y tratamiento del sonido.

Se requiere un sistema dinámico, flexible y portátil que pueda ser usado en conciertos o en estudios de grabación sin necesidad de mover gran cantidad de equipos, de esta forma mejorar la calidad y fidelidad del sonido en vivo.

Aprovechando la flexibilidad que brindan los FPGAs y las prestaciones que estos presentan para el procesamiento de las señales de audio, se podrá variar la señal produciendo efectos de distorsión, eco, reverberación, *delay*, trémolo, *chorus* entre otros y poder simular como sonaría en ambientes como teatro, catedral y concierto (reverberación). Para ello se usaran diferentes algoritmos que serán los encargados de procesar la señal; además de contar con filtros para mejorar la calidad, reducir el ruido y obtener una mejor definición en los amplificadores.

Al estar presente la tendencia de migrar a la tecnología digital, nuestro país no es ajeno a este desarrollo; el presente estudio, busca mostrar la factibilidad de poder usar tecnología FPGA para el procesamiento de las señales sonoras y poder migrar de la tecnología analógica a la digital.

El objetivo del siguiente trabajo es diseñar un sistema de procesamiento digital de sonido basado en la tecnología FPGA, para su uso en estudios de grabación y conciertos con la

finalidad de brindar una herramienta más eficiente y lograr cambiar el sonido del instrumento en curso de la interpretación de la composición.

Dentro de los objetivos específicos tenemos:

- Implementar cuatro efectos de sonido *delay*, *delay* cruzado, *flanger* y reverberación.
- Diseñar filtros para implementar los efectos.
- Hacer simulaciones de los filtros en Matlab usando señales grabadas.
- Simulación de los filtros haciendo uso de la interfaz Matlab/Simulink System Generator e ISE de Xilinx.
- Implementar en el FPGA Virtex II - Pro los efectos: *delay*, *delay* cruzado y reverberación.

2.5. Modelo teórico

Se plantea un modelo teórico (ver Figura 2.9) teniendo en cuenta que para procesar una pieza musical se modifican valores importantes que si no son tratados con cuidado se perdería información de las señales de sonido y por ende la reproducción sería distorsionada.

El sistema tiene una entrada de adquisición de datos, en este caso el sonido de un instrumento musical o reproducción de una canción; para la adquisición de la señal y debido a su carácter analógico, se aprovecha las interfaces que brinda la tarjeta de desarrollo Virtex II-Pro de la empresa Xilinx la cual cuenta con; además del FPGA, un audio *codec* AC97 estéreo que cuenta con un AC/DC (convertor análogo digital, digital análogo) para realizar la lectura de los datos y poder tenerlos en formato digital [11].

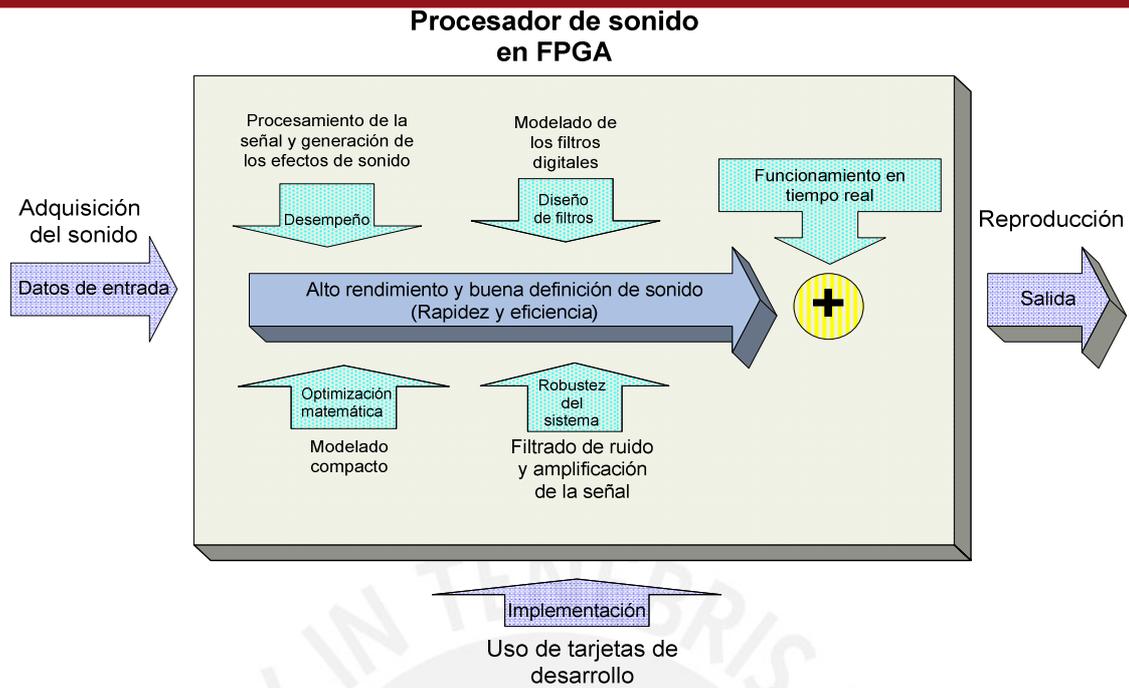


Figura 2.9. Representación gráfica del modelo teórico.

Se busca realizar el procesamiento de la señal y la generación de los efectos que variarán el sonido dentro del FPGA, para ello se plantea un banco de bloques los cuales contendrán los diferentes efectos a implementar.

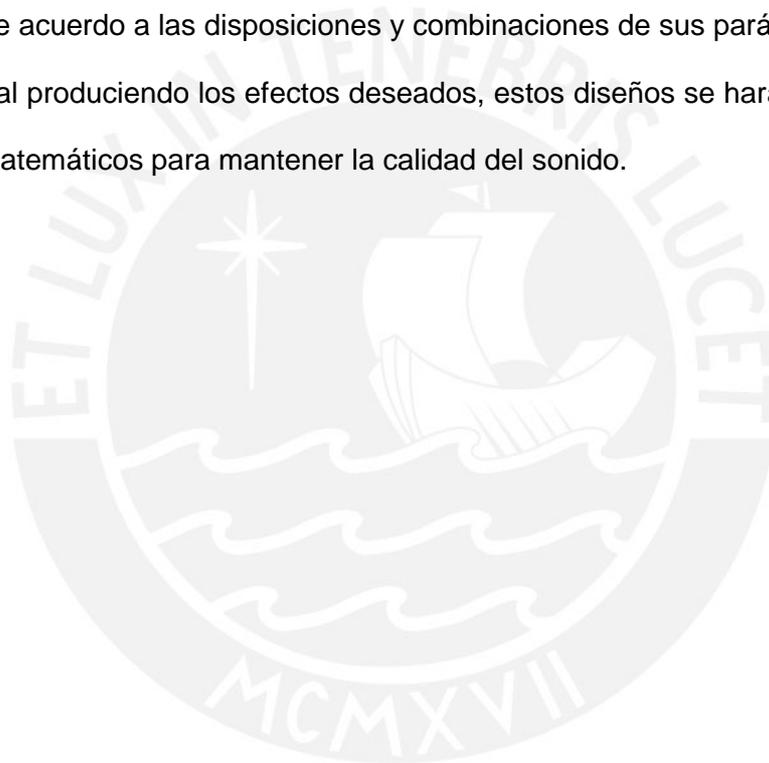
Se quiere modelar los principios de la acústica con modelos físico-matemáticos haciendo uso de algoritmos como el de Schroeder para simular reverberación, teniendo en cuenta realizar el menor número de cálculos posibles para no producir retardo en el procesamiento de las señales y que haya latencia en el audio [2] [8].

Se busca rapidez y eficiencia en el procesamiento de la información, esto viene ligado al carácter sonoro de las piezas a reproducir, se quiere obtener un alto rendimiento en el tratamiento de las señales, las cuales se realizarán en un FPGA para aprovechar la facilidad de implementación de hardware digital; además, se busca mejorar o mantener la calidad y buena definición del sonido logrando que este sea de agrado del usuario.

Con la finalidad de buscar las mejores prestaciones, se usará la tarjeta de desarrollo FPGA Virtex II-Pro y aprovechar las interfaces que esta tiene para la implementación.

El funcionamiento será en tiempo real, para ello se necesita gran capacidad de procesamiento, bancos de almacenamiento y óptimo diseño de los filtros a implementar para asegurar la buena recuperación de las señales sonoras.

Los efectos se realizarán modelando filtros digitales, los cuales serán grabados en el FPGA, que de acuerdo a las disposiciones y combinaciones de sus parámetros se logrará alterar la señal produciendo los efectos deseados, estos diseños se harán respetando los modelos matemáticos para mantener la calidad del sonido.



CAPÍTULO 3

3. DISEÑO DE LOS EFECTOS DE SONIDO

Son múltiples las sensaciones que provocan los acordes musicales en el sistema sensorial humano, desde el más sublime placer hasta la más detestable sensación de molestia. Por ejemplo, la sensación de colocarse a la orilla de un acantilado y gritar una palabra con el objetivo de escucharla un momento después nuevamente. Muchos de estos efectos enriquecen nuestro gusto musical y despiertan nuevas sensaciones en nuestro ser. Por tal motivo se buscan medios artificiales de reproducir y generar estos efectos capaces de explotar a otro nivel los sistemas sensoriales, en este caso, el oído. En la presente sección haremos una breve descripción del sistema a implementar y algunos efectos más populares en la actualidad en el tratamiento de sonido, y sus modelos matemáticos para su implementación.

3.1. Sistema a implementar

En la Figura 3.1 se muestra el diagrama de bloques del sistema, todo se diseña sobre la tarjeta de desarrollo XUP Virtex-II Pro de la empresa Xilinx (ver Figura 3.2). El diseño de los efectos se realizará sobre el XC2VP30 FPGA haciendo uso del software *System Generator* para *DSP* Matlab/Simulink y la captura y reproducción de las señales de audio se harán con el audio *codec* AC97 interno de la tarjeta [11] [18].

System Generator para DSP es una herramienta que permite diseños para DSP de alto rendimiento sobre Xilinx FPGAs directamente desde la familia Matlab/Simulink usando el entorno MathWorks, con esta plataforma los diseños de la arquitectura a implementar se hace más factible sin necesidad de lenguajes como VHDL o Verilog. Además presenta interfaces de co-simulación con lo cual se puede acelerar el sistema a nivel de simulaciones (ver Figura 3.3) [18] [25].

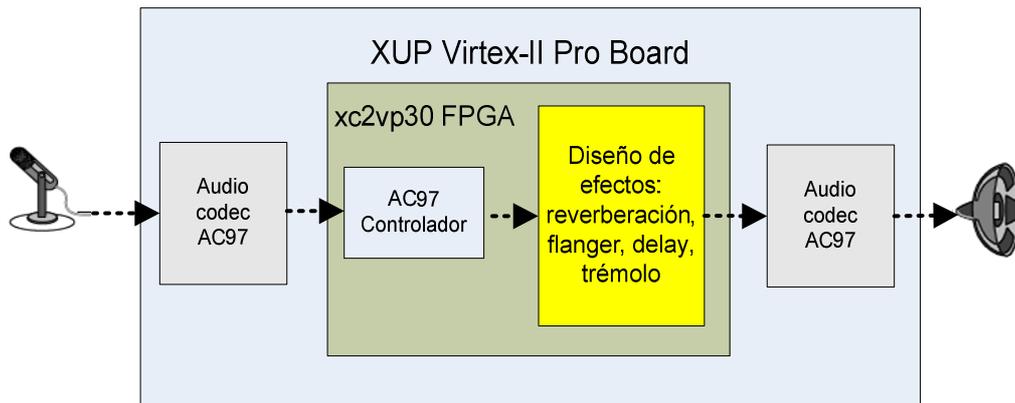


Figura 3.1. Diagrama del sistema

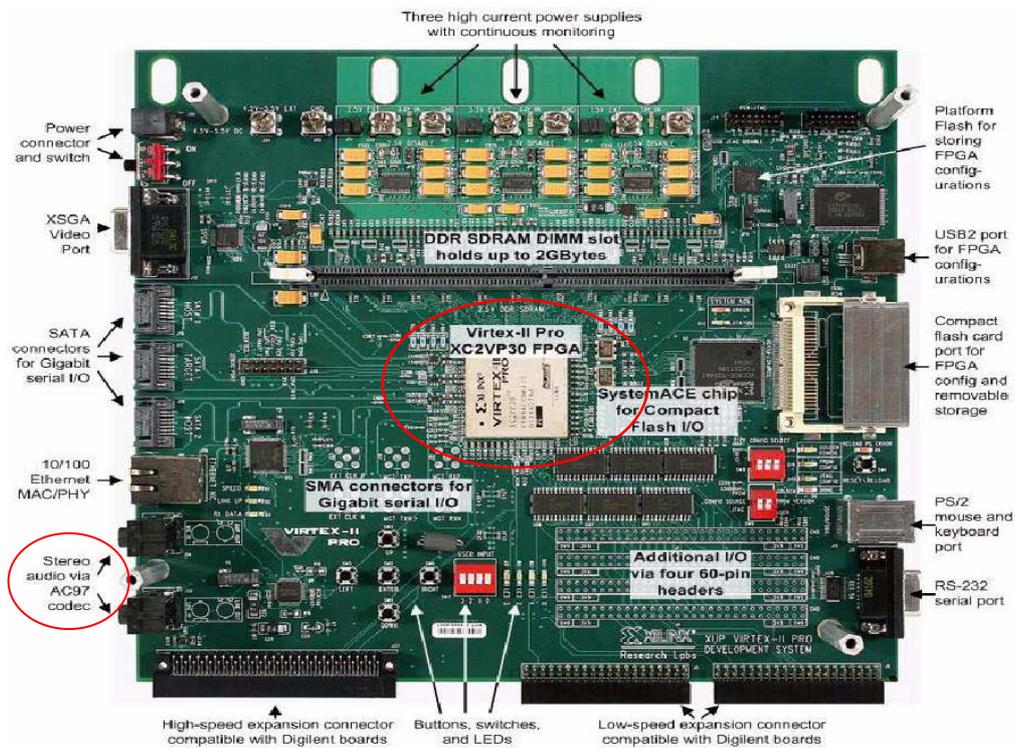


Figura 3.2. Tarjeta de desarrollo XUP Virtex-II Pro (Fuente: Xilinx)

El modelo creado en Matlab/Simulink usa el bloque *System Generator Token* el cual crea un archivo en código HDL que contiene el diseño en VHDL. El ISE (software de la empresa Xilinx) es el encargado de sintetizar la información que es generada por el diseño en Matlab/Simulink y genera un archivo `.ngc netlist` que además contiene la información de los periféricos que se van a usar durante la aplicación. Finalmente el diseño es llevado a la tarjeta por medio del ISE o la interfaz Jtag desde *System Generator*. En la Figura 3.4 se muestra el flujo de diseño para este tipo de aplicaciones [11] [13] [18].

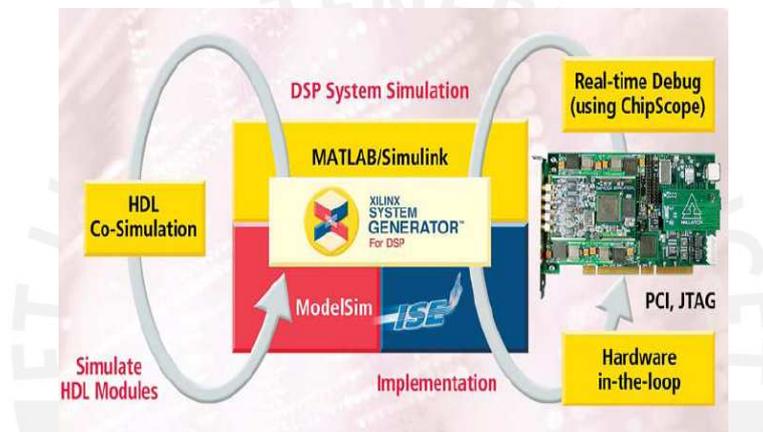


Figura 3.3. Flujo de diseño con *System Generator* (Fuente: Xilinx)

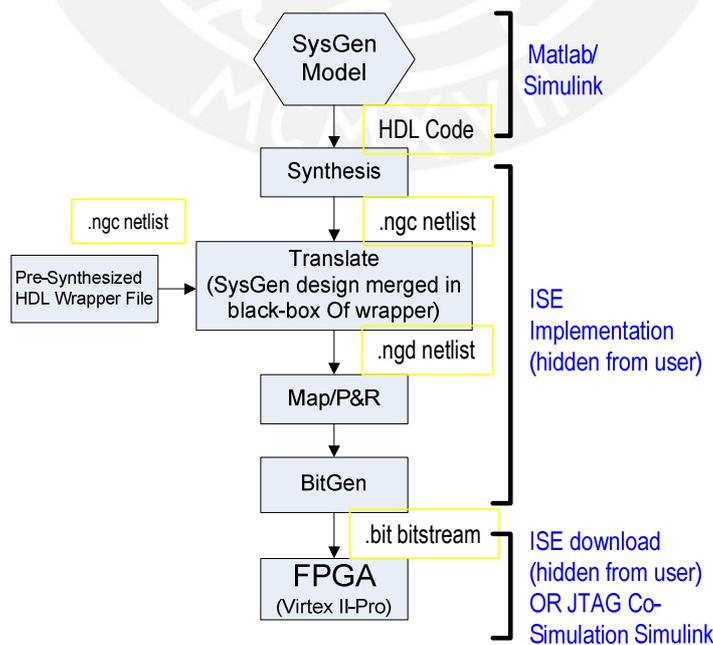


Figura 3.4. Archivos generados durante el diseño (Fuente: Xilinx)

3.1.1. Audio codec AC97

El sistema de audio en la XUP Virtex-II Pro consiste en el LM4550 AC97 *Audio Codec* de la empresa *Nacional Semiconductor*, además cuenta con el TPA6111A un amplificador estéreo de la empresa *Texas Instruments*. Tiene *full duplex* estéreo ADC y DAC con un mezclador a analógico que combina las entradas de línea, micrófono y datos en PCM. El AC97 *Codec* se utiliza ampliamente en sistemas de audio en PCs y MACs. El hardware interno AC97 de la tarjeta de desarrollo es el encargado de la captura y reproducción del sonido en estéreo [11] [18].

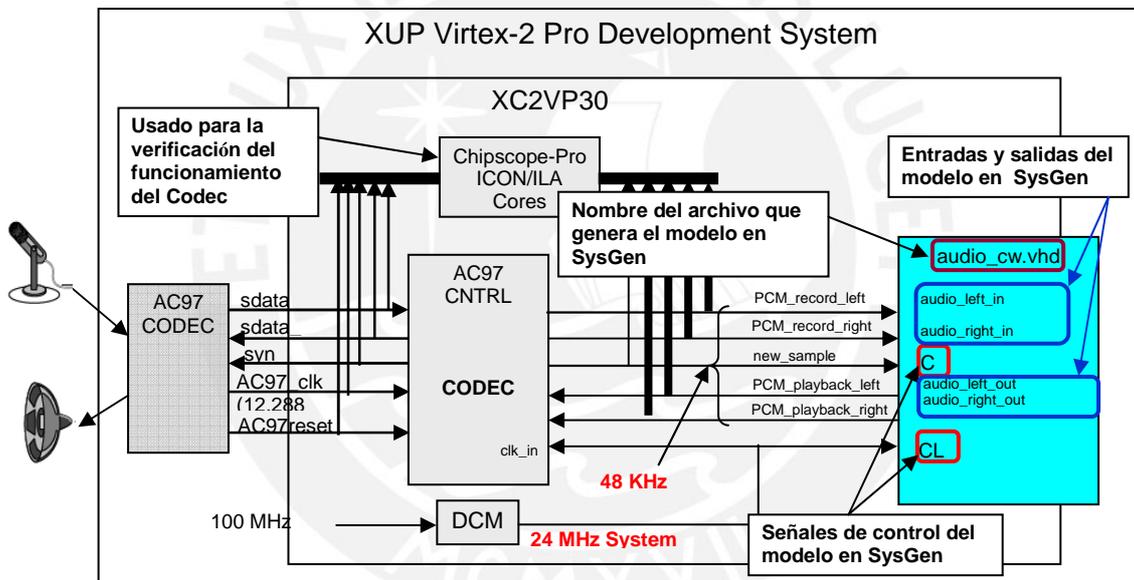


Figura 3.5. Diagrama del configuración del *Codec AC97* con *System Generator*

En la Figura 3.5 se muestra la configuración del controlador y las señales de control que se deben tener en cuenta para su correcto funcionamiento del AC97 el FPGA controla el *codec AC97* y proporciona información del control de los datos en PCM. El AC97 consta de cuatro señales a tener en cuenta: "AC97_BIT_CLOCK" sincroniza el reloj para tener las señales de datos en serie; "AC97_SYNCH" se encarga de la sincronización de pulsos de control; "AC97_SDATA_IN" lleva los datos en serie del

codec al controlador; "AC97_SDATA_OUT" lleva los datos en serie del controlador al codec; el AC97 regresa a su estado inicial cuando "AUDIO_RESET_Z" es puesta en nivel alto por el controlador; finalmente se tiene la señal de "BEEP_TONE_IN" que emite un tono si la configuración es correcta. En la Tabla 3.1 se tiene las direcciones así como los pines del FPGA que se deben configurar para el uso del codec AC97 [11] [13].

Tabla 3.1. Señales de datos y control del Audio codec AC97 [14]

Señal	Dirección	Pin FPGA	IO Tipo	Drive
AC97_SDATA_OUT	O	E8	LVTTL	8mA
AC97_SDATA_IN	I	E9	LVTTL	---
AC97_SYNCH	O	F7	LVTTL	8mA
AC97_BIT_CLOCK	I	F8	LVTTL	---
AUDIO_RESET_Z	O	E6	LVTTL	8mA
BEEP_TONE_IN	O	E7	LVTTL	8mA

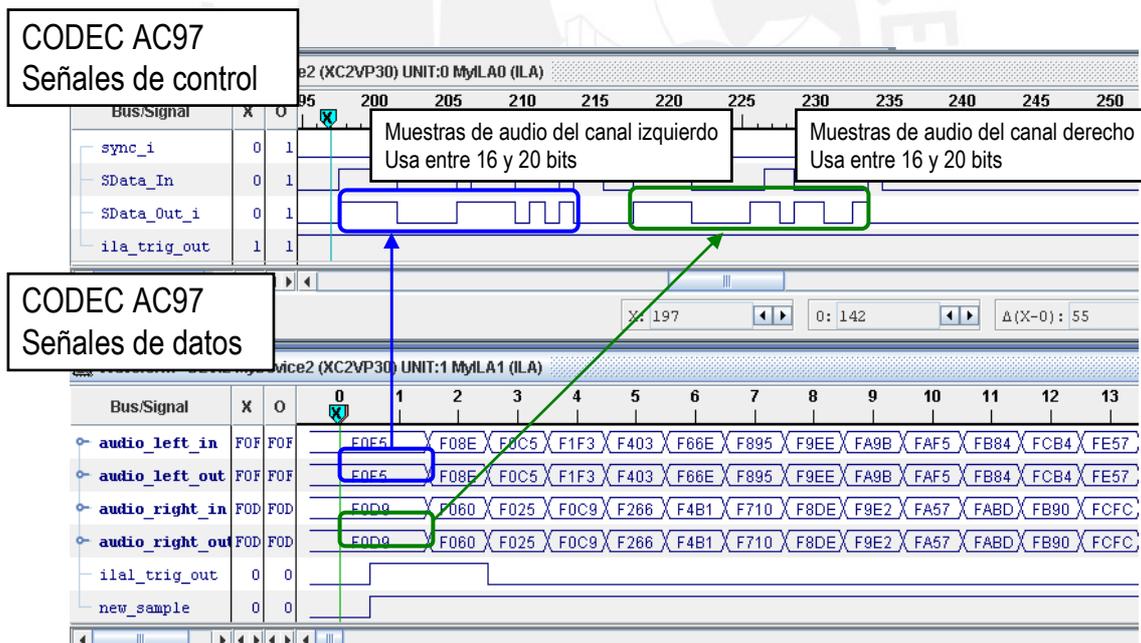


Figura 3.6. Simulación de las tramas de datos del controlador de audio AC97

Con ayuda de Chipscope-Pro software de Xilinx vemos en la Figura 3.6 la simulación del correcto funcionamiento para una trama de datos de prueba del audio codec AC97. Como vemos para transmitir los datos desde el controlador al codec para su captura o

reproducción necesitamos entre 16 a 20 bits y el sincronismo entre las señales de control y de datos.

3.1.2. Diseño del sistema interno en el FPGA

El diseño se realizará con *System Generator (SysGen) blockset* para DSP de Xilinx, el objetivo es diseñar la arquitectura con ayuda de las los *blockset* para MatLab/Simulink del SysGen de Xilinx haciendo más fácil y flexible el diseño de los algoritmos. En la Figura 3.7 se muestra la implementación de los canales R (derecho) y L (izquierdo) para tener una señal de salida en estéreo; dentro del subsistema System se encuentra el diseño de los algoritmos a implementar para generar los efectos al sonido capturado [18].

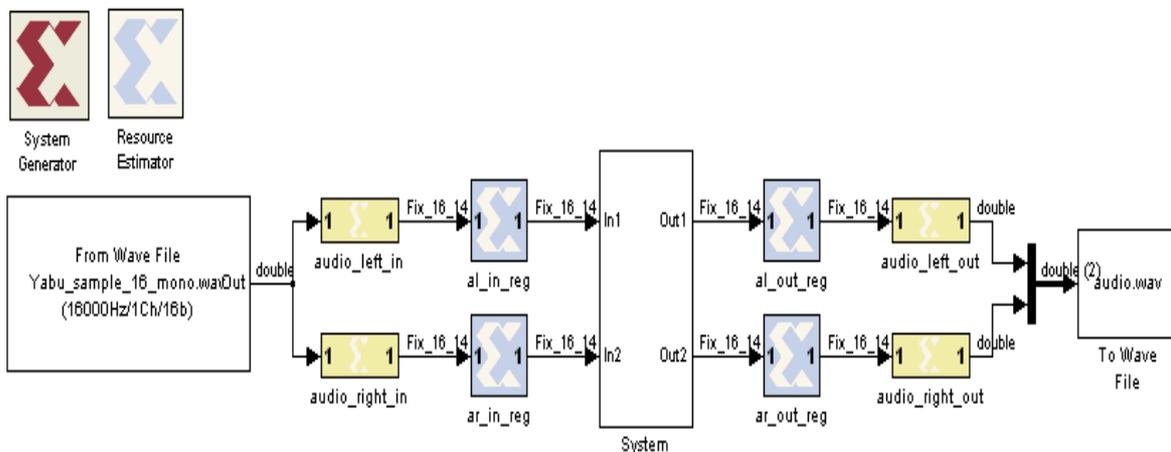


Figura 3.7. Arquitectura en base a los bloques de *System Generator* Matlab/Simulink

3.2. Efectos basados en líneas de retardo

La mayoría de los efectos usados en música electroacústica son obtenidos por composición de líneas de retardo variantes en el tiempo, en efecto, por líneas cuyas longitudes son moduladas por señales que varían lentamente. Este tipo de efectos

están basados en el *delay* o retardo como unidad fundamental para implementar otros efectos más complejos.

3.2.1. *Delay*

El *delay* es uno de los efectos más simples que consiste en la multiplicación y retraso modulado de una señal sonora. Una vez procesada la señal se mezcla con la original produciendo un efecto de eco sonoro. Así, un poco de *delay* puede “dar vida” a mezclas apagadas, ampliar el sonido de un instrumento e incluso permite tocar un solo (interpretación del instrumento con mayor realce como la voz en una canción) sobre uno mismo [21]. La unidad de *delay* es también un elemento constructivo básico para la elaboración de otros efectos más complejos como reverb, chorus y flanger [15].

Cuenta con los siguientes parámetros de control:

- Retraso: El tiempo (en milisegundos) que tarda en producirse el eco.
- Retroalimentación o *feedback*: Es la cantidad de veces que se repite la señal sonora, esta puede variar de valor dependiendo del efecto que se quiera lograr.
- Mezcla: Es la cantidad de sonido retrasado que se mezcla con la señal original.

3.2.1.1. Principio y modelado

En su forma más simple, la unidad de *delay* toma una señal de audio y la reproduce de nuevo después de un tiempo de retardo, escalada y mezclada con la señal actual. Este tiempo de retraso puede oscilar en el rango de varios milisegundos (efecto parecido a un coro) hasta varios segundos (produciéndose una repetición del sonido bien definida y apreciada de forma separada a la reproducción original) [15]. En la Figura 3.8 se presenta el diagrama de la unidad de *delay* en su modelo básico.

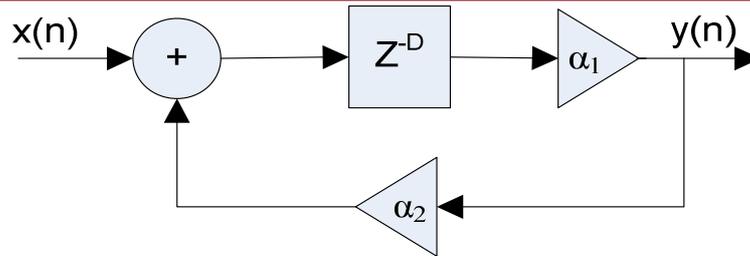


Figura 3.8. Esquema básico de una línea de retardo *delay* realimentado

Cuya función de transferencia para $\alpha_1 = 1$ está dada por:

$$H(Z) = \frac{Z^{-D}}{(1 - \alpha_2 * Z^{-D})} \quad (1)$$

Este filtro realiza un infinito número de retardos espaciados D periodos simples con un decaimiento exponencial de amplitud, con α_2 se controla la ganancia de la realimentación y α_1 controla la cantidad de retardo que se percibe. Con la realimentación se logra muchas unidades de *delay* tomando la salida y la envía de vuelta a la entrada, así se logra la habilidad de repetir el sonido una y otra vez de forma que las copias del original se van atenuando cada vez que se repiten, como condición para garantizar la estabilidad del sistema la ganancia de realimentación α_2 tiene que ser menor que la unidad. Con este lazo de realimentación, el sonido es teóricamente repetido eternamente (al menos hasta que se apague el sistema); no obstante, después de un punto se volverá tan tenue que estará por debajo del ruido ambiente y será inaudible [15] [20] [21].

En la Figura 3.9 se muestra la respuesta al impulso unitario de la unidad de *delay* realimentada con $D=1$ y $\alpha_2 = 0.9$.

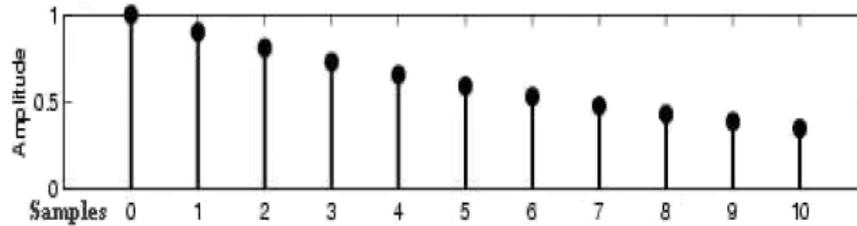


Figura 3.9. Respuesta del impulso unitario del *delay* para $D=1$ y $\alpha_2 = 0.9$

3.2.1.2. Simulación e implementación

El algoritmo de *delay* es relativamente sencillo y como ya se mencionó anteriormente la implementación se realizará en base a Matlab/Simulink haciendo uso de los bloques del System Generator que Xilinx proporciona para la simulación y desarrollo de aplicaciones.

3.2.1.2.1. Simulación

Para la simulación del algoritmo de *delay* se implementó en bloques Simulink, en base a esta simulación se logró ver el funcionamiento de los parámetros como el valor de las ganancias α_1 y α_2 además del valor de D que da un valor de retardos para *delay*. En la figura 3.10 se muestra el diseño usado en la simulación del efecto.

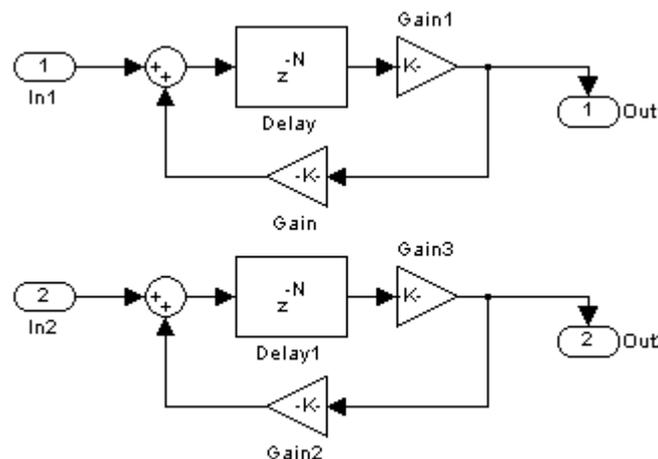


Figura 3.10. Modelo de *delay* en bloques Simulink

3.2.1.2.2. Implementación

Xilinx proporciona System Generator (bloques para Simulink) para el desarrollo de aplicaciones para sus productos, en este caso, la tarjeta de desarrollo Virtex II-Pro. A continuación se presenta el diseño para este algoritmo paso a paso a fin de proporcionar una metodología para el diseño con esta herramienta.

- Todo diseño usando System Generator debe de llevar como elemento básico al bloque *System Generator Token* (ver figura 3.12), encargado de la compilación y configuración de los parámetros de todo el proyecto. En la figura 3.11 se muestran las librerías básicas de Xilinx [18].

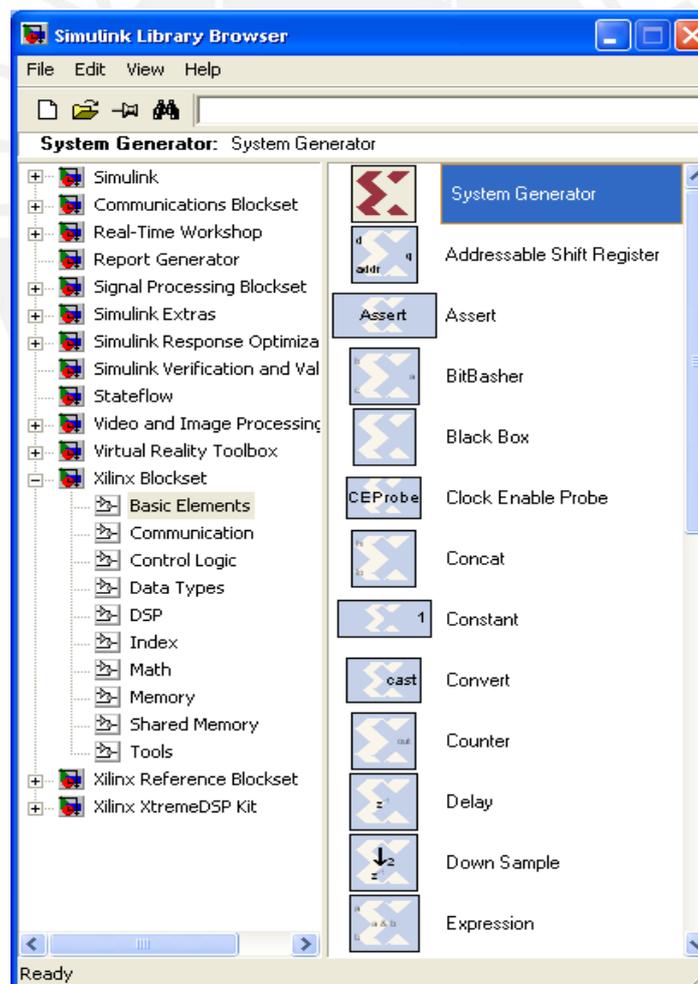


Figura 3.11. Xilinx Blockset, elementos básicos para el diseño



Figura 3.12. System Generator Token

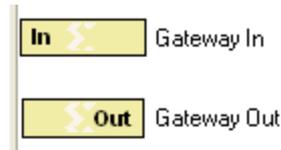


Figura 3.13. Bloques básicos – puertos de entrada y salida

- Se debe usar los bloques básicos para los puertos de entrada y salidas *In* y *Out* (ver Figura 3.13) para acondicionar los datos que van a ir al FPGA, y durante el proceso de compilación se generan los archivos con la configuración necesaria para su correcto funcionamiento [18].
- Los *blockset* de Xilinx facilitan el desarrollo de la aplicación porque se puede realizar el diseño igual que en Simulink, lo que dificulta la implementación es la configuración de los parámetros de cada bloque: el tipo de dato, número de bits, periodo de muestreo, etc. Son parámetros muy importantes porque depende de las configuraciones que se den en los bloques la cantidad de recursos que se consuman y el área que ocupa el diseño en el FPGA además de optimizar la aplicación [18].
- En la Figura 3.14 se muestra la implementación del algoritmo de *delay* para el sistema antes mencionado (Figura 3.7), en el subsistema se encuentra implementado el efecto de *delay* para los dos canales R y L de estéreo [18].
- Es importante tener en cuenta la configuración de los parámetros de cada bloque, en este caso el flujo de la señal al pasar por cada bloque se ve alterada por las operaciones que se realizan; como vemos en la Figura 3.14 el flujo de los bits y el tipo de dato de la entrada *Fix_16_14* se ve alterado por la realimentación teniendo

a la salida Fix_33_28 datos no validos para la salida del subsistema; para ello hay que acondicionar la señal haciendo uso de los bloques *Slice* y *Reinterpret* que acondicionan la señales y sin alterar el mensaje original [18].

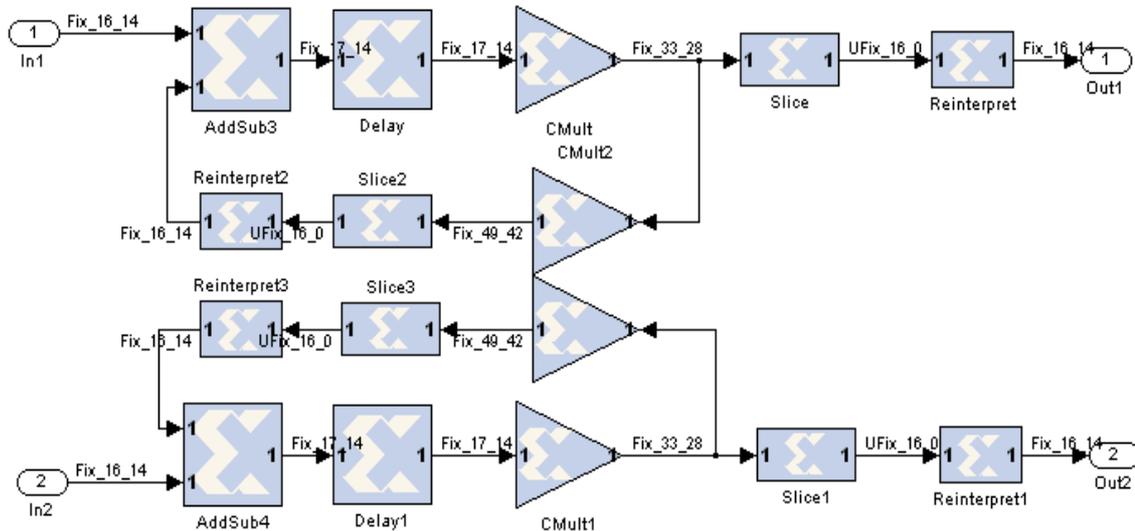


Figura 3.14. Diseño de línea de retardo *delay* en *System Generator*

3.2.2. Delay cruzado

Como su nombre lo indica, esta unidad (basada en la unidad básica de *delay* el principio y modelado es el mismo) produce un sonido balanceante, típicamente rebotando entre los dos canales derecho e izquierdo del estéreo [15]. En la Figura 3.15 se muestra del diagrama del sistema y el usado para la simulación con Simulink.

Este tipo de efecto se implementa con dos líneas de retardo independientes, cada una generada por una entrada y con la particularidad de realimentarse de forma cruzada, quiere decir que la ganancia de la realimentación depende de la otra línea de retardo [21] [22].

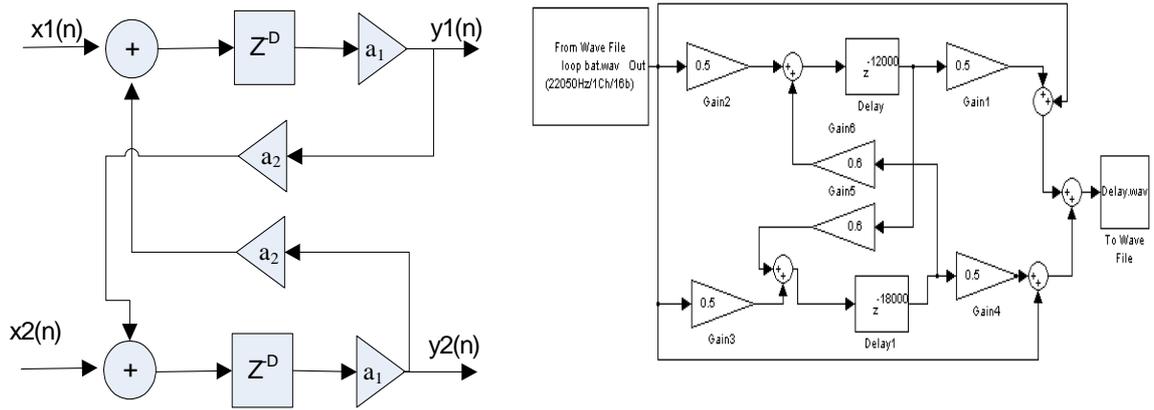


Figura 3.15. Diagrama del efecto *delay* cruzado

3.2.2.1. Implementación

En la Figura 3.16 se muestra el sistema ya implementado con los bloques de Xilinx, hay que tener en cuenta el número de datos y de bits para las realimentaciones, de no ser así provocaría un error en la compilación; además, sólo tiene efecto en las bajas frecuencias atenuándose en las altas por lo que es muy apropiado con instrumentos que están bajo los 800Hz como bajo, bombo entre otros [21].

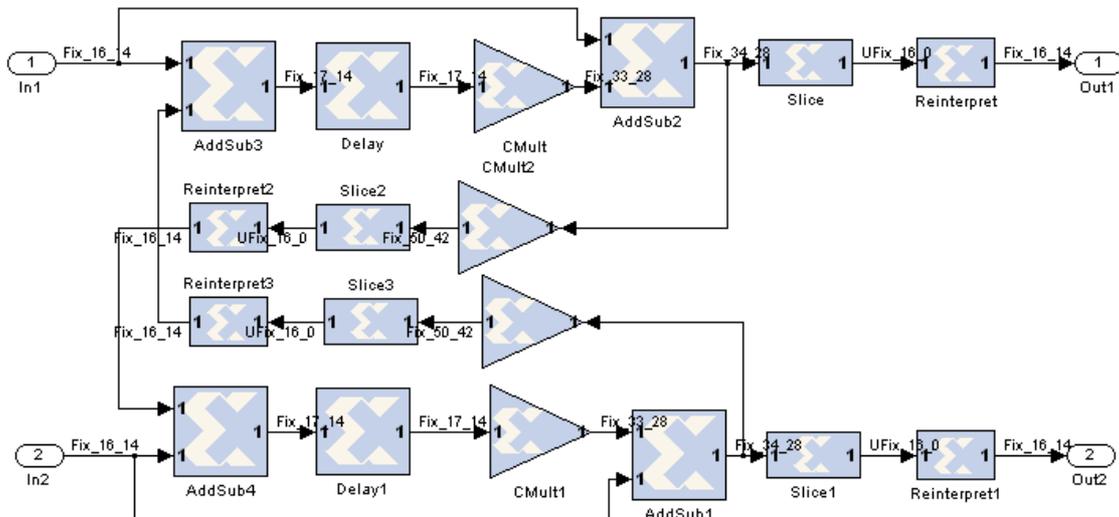


Figura 3.16. Implementación del *delay* cruzado

3.2.3. Flanger

El efecto *flanger* produce un sonido muy característico, llamado a menudo con el término en inglés *whoosing*. Se trata de un filtrado periódico (en forma de peine) de una serie de frecuencias determinada por el tiempo de retardo (por ejemplo, con uno de 0.5 milisegundos, 2KHz y sus armónicos); este efecto se caracteriza por que crea un grupo de muestras igualmente espaciadas en el espectro de audio que se desplazarán armónicamente filtrando la señal de forma que se produce dicho efecto [15] [21] [22].

3.2.3.1. Principio y modelado

En la Figura 3.17 se muestra el modelo del *flanger*, obsérvese que la base del modelo es la misma estructura del *delay* básico sin realimentación, en este modelo las variaciones de tono que el efecto requiere pues un tiempo de retardo que no sea fijo, por lo que es necesario añadir un segundo elemento. Este último elemento que completa el modelo es el encargado de variar el tiempo de retardo para conseguir la modulación del tono [15].

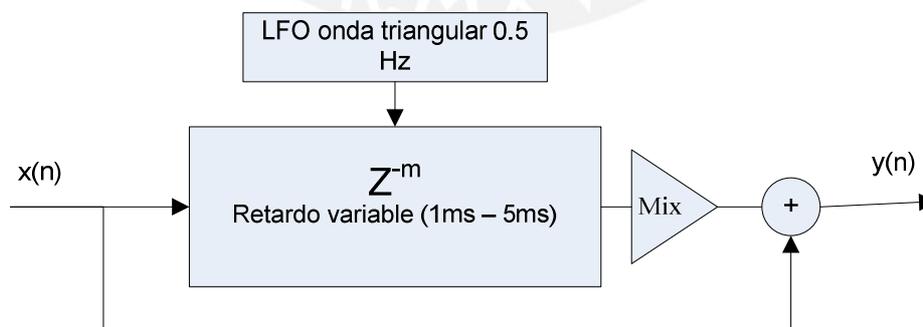


Figura 3.17. Modelo del *flanger*

En general cualquier forma de onda periódica se puede usar (seno o coseno) la que debe cambiar lentamente (de 3 Hz o menor frecuencia), nos referimos a esta fuente como un LFO (*Low Frequency Oscillator*) oscilador de baja frecuencia. Se puede controlar el efecto cambiando la frecuencia de la forma de onda y su amplitud con esto se completa el modelo y la ecuación de diferencia estaría dada por:

$$y(n) = x(n) + Mix * x(n - m). \quad (2)$$

Donde Mix controla la cantidad de retardo (a modo de coro) que se percibe y m representa el número de *samples* de retraso para el eco, donde el tiempo correspondiente para m *samples* de retraso es $t_{\text{delay}} = m * T_s$, donde T_s es el período de muestreo. Este tiempo de retraso es el que varía de acuerdo con el LFO [22].

Finalmente se tiene una señal mezclada con el eco que esta produce, donde la longitud del retardo está constantemente cambiando. Por lo tanto, para la construcción del modelo definitivo, partimos del modelo básico de *delay* sin realimentar esta unidad no es otra cosa que un filtro peine (*comb filter*) que produce una serie de muescas en la respuesta en frecuencia (ver Figura 3.18). Para producirlas, basta con mezclar la muestra retardada con la entrada actual. Entonces, para algunas frecuencias el retraso de fase introducido será de 180° , lo que es equivalente a añadir exactamente la entrada pero negativa. Así mezclando esta señal con la entrada, las frecuencias que experimentaron el retraso de 180° se cancelan exactamente con las componentes originales de la entrada para tales frecuencias (interferencia destructiva), originando las muescas para dichas frecuencias. El caso contrario se dará cuando el desfase producido sea de 360° en cuyo caso las señales original y retrasada se sumarán doblando su valor (interferencia constructiva) [15] [21] [22].

Con el retraso tan corto como es característico del *flanger*, el eco no será audible ni la superposición de sonidos, lo que sucede es que las muescas propias de la respuesta

en frecuencia de este filtro están muy espaciadas, produciendo un efecto de filtrado frecuencial apreciable (con tiempos de retardo mayores se tendrá mejor percepción del sonido tratado). El efecto completo se consigue cuando se varía este retraso en el rango típico de 1 a 10 milisegundos, lo que da lugar a la compresión y expansión de las muescas de la respuesta en frecuencia del modelo, éste movimiento es el que caracteriza al sonido del *flanger*. En la Figura 3.19 se muestran la máxima compresión de la característica frecuencial (mayor retardo) y el de la mínima compresión (menor retardo) [15].

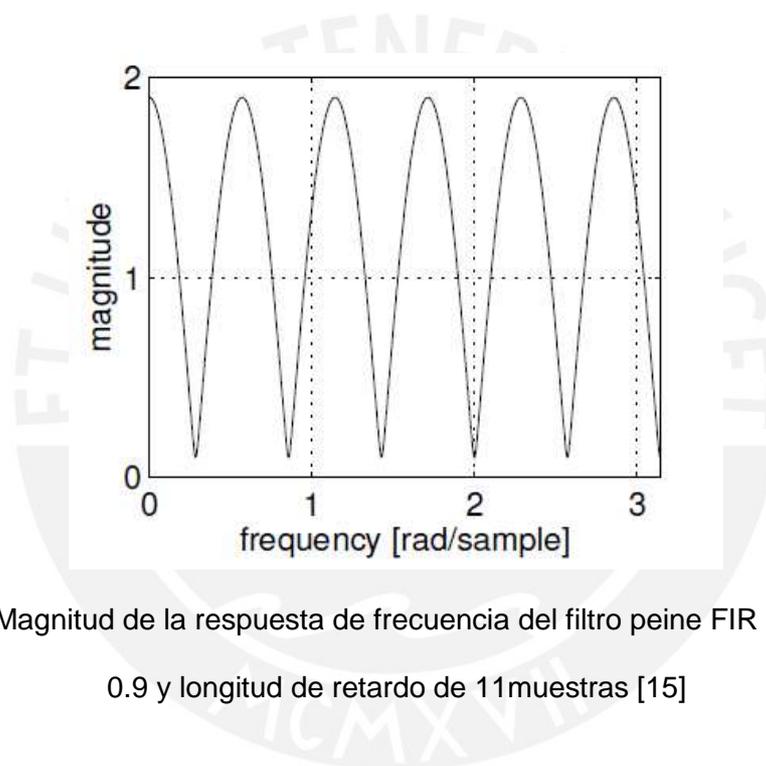


Figura 3.18. Magnitud de la respuesta de frecuencia del filtro peine FIR con atenuación 0.9 y longitud de retardo de 11muestras [15]

El sonido característico del *flanger* resulta cuando las muescas de la respuesta van recorriendo el eje de frecuencias a lo largo del tiempo como resultado de la variación del retraso en un LFO (a una frecuencia de 0.5Hz aproximadamente). Así, cuando el retraso se incrementa, las muescas se comprimen hacia las bajas frecuencias.

La forma de onda del LFO será triangular preferiblemente o senoidal. Como ya se explicó, el cambio del tiempo de retraso del *flanger* produce modulación de tono en la copia del sonido original, copia que luego será mezclada con la señal original [15] [22].

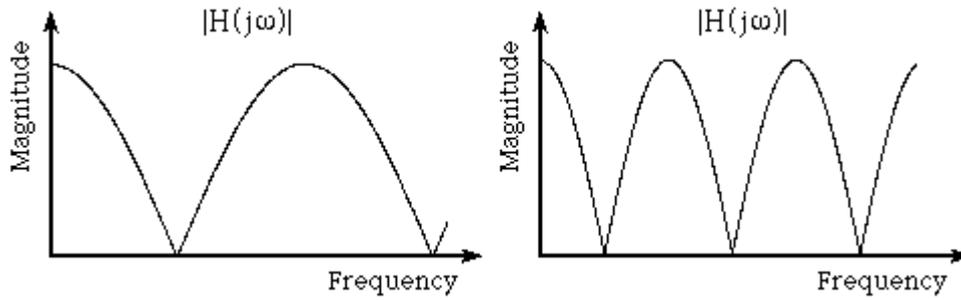


Figura 3.19. Movimientos característicos en frecuencia del *flanger* [15]

3.2.3.2. Simulación

En la Figura 3.20 se muestra el efecto *flanger* implementado con bloques Simulink, el LFO (oscilador de baja frecuencia) se implementa con una señal triangular de 0.5 Hz además de una constante DC de 20 con ello generar el retardo variable en el bloque de *delay*; se tiene que la unidad básica de *delay* pero los retardos serán modificados de acuerdo a la onda del LFO que finalmente se mezclará con la entrada (sonido pregrabado) no retardada. A la salida del sistema se coloca una ganancia con la finalidad de controlar la intensidad de la señal de salida.

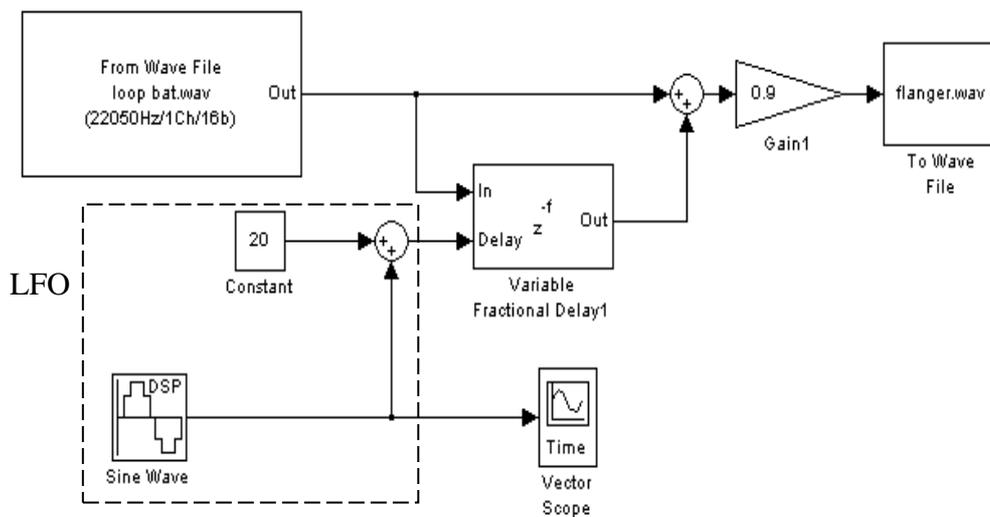


Figura 3.20. Efecto *flanger* con bloques Simulink

3.2.4. Reverberación

La reverberación es probablemente uno de los efectos más utilizados en la música. Muchas veces no se da la importancia a la reverberación y sin embargo está a nuestro alrededor de forma natural, la escuchamos en todos lados y sin la ayuda de ningún tipo de procesador especial [2] [8].

3.2.4.1. Principio y modelado

El sistema auditivo responde a diversas características tanto de la fuente sonora como del medio de propagación, en general estos son los elementos a controlar para la recreación de sonidos deseados (procesado espacial).

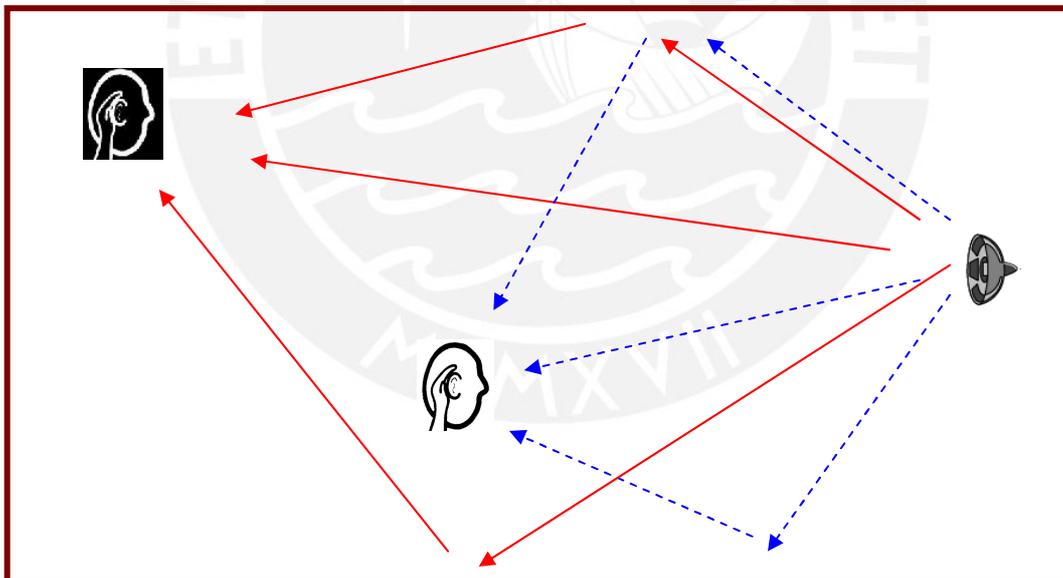


Figura 3.21. Caminos que recorre el sonido

La reverberación es la suma total de las reflexiones del sonido que llegan al lugar del oyente en diferentes momentos de tiempo. Auditivamente se caracteriza por una prolongación, a modo de “cola sonora”, que se añade al sonido original. La duración y

la coloración tímbrica de esta cola dependen de la distancia entre el oyente, la fuente sonora y la naturaleza de las superficies que reflejan el sonido (ver figura 3.21) [2] [32].

Se puede decir, erróneamente, que la reverberación es una serie de ecos. El eco generalmente implica una versión retardada del sonido, la cual se escucha con un retardo mayor o igual a 200 milisegundos. En la reverberación, cada onda de sonido retardada llega en un periodo de tiempo tan corto que la onda reflejada no es percibida como una copia del original. Así, a pesar de no poder distinguir a cada onda reflejada, si podemos escuchar el efecto generado por toda la serie de reflexiones [27] [29].

Con un modelo realimentado de *delay*, como ya se explicó, se podría producir reverberación; no obstante, una unidad de este tipo puede causar un efecto similar, pero no tiene en cuenta una serie de características fundamentales para realizar un modelado realista de la reverberación. Primero, no se podrá modelar el hecho de que la tasa de llegadas de las ondas reflejadas que llega al oyente varía con el tiempo, pues este modelo sólo puede simular reflexiones con un intervalo fijo entre ellas [2] [15].

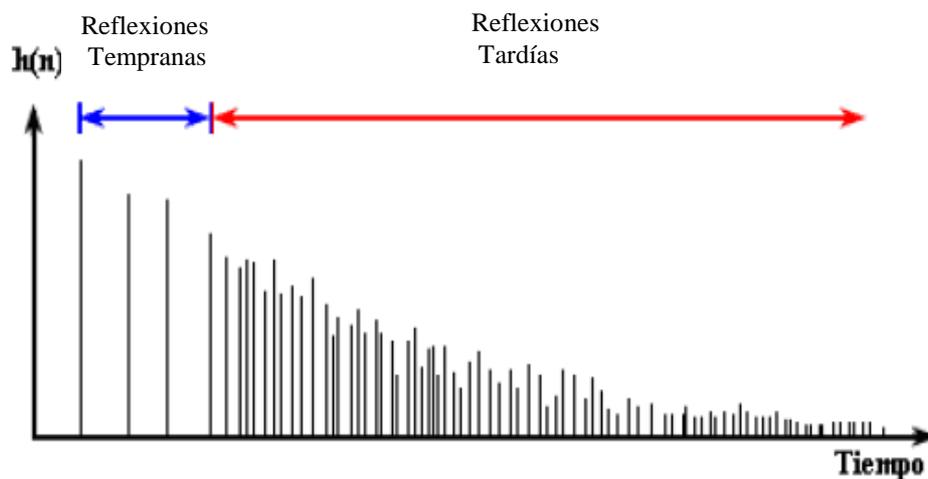


Figura 3.22. Respuesta al impulso unitario de una reverberación realista [2]

En una simulación natural, realista de la reverberación, deben existir reflexiones tempranas y reflexiones tardías. Así, tras la llegada de la onda directa, aparece un corto espacio de tiempo en el que las reflexiones se caracterizan por ser bien definidas. Estas reflexiones están directamente relacionadas con la forma y tamaño de la habitación, como con la posición de la fuente del sonido y del oyente. Son las denominadas reflexiones tempranas. Luego de estas reflexiones, la tasa de ondas reflejadas que llegan al oído aumenta considerablemente. En este segundo período, las reflexiones son más aleatorias y difícilmente relacionables con las características físicas de la habitación. Esto es lo que se denomina reverberación difusa o reflexiones tardías. Se cree que este segundo tipo de reflexión es el factor primario al diseñar el tamaño de una habitación y decae exponencialmente en los auditorios con buen sonido acústico (Figura 3.21). En la Figura 3.22 se muestra la respuesta al impulso unitario de la reverberación natural de una habitación acústica [32].

Una característica importante de la reverberación realista es la correlación de las señales que llegan al oído. Para darle al oyente una verdadera sensación de ambiente espacioso, el sonido que llega a cada oído debe ser en cierta forma incoherente. Esta es una de las razones por la que una sala de conciertos tiene techos altos. Así, al usar techos altos, las primeras reflexiones que llegan al oído serán las procedentes del rebote de las paredes, y como éstas están situadas a diferentes distancias una de otra respecto al oyente, el sonido que llega a cada oído lo hará en momentos distintos. Las reflexiones procedentes del techo, por su parte, llegarán a la vez pero después de las procedentes de las paredes [2] [32].

Para el desarrollo de este efecto, nos basamos en el algoritmo del reverberador de Schroeder, podríamos decir que es el modelado acústico más natural, en cuanto a efectos de reverberación se refiere. Este reverberador es una combinación de diversos arreglos en paralelo de reverberadores planos (Figura 3.8) y a su vez estos arreglos

en cascada con reverberadores del tipo pasa todo (Figura 3.24). Este reverberador logra que el efecto de reverberación en los ecos aumente, generando e incrementando la respuesta al impulso causadas generalmente por las primeras reflexiones (*early reflection*) y las últimas reflexiones (*late reflection*). En la figura 3.23 se muestra el algoritmo [2].

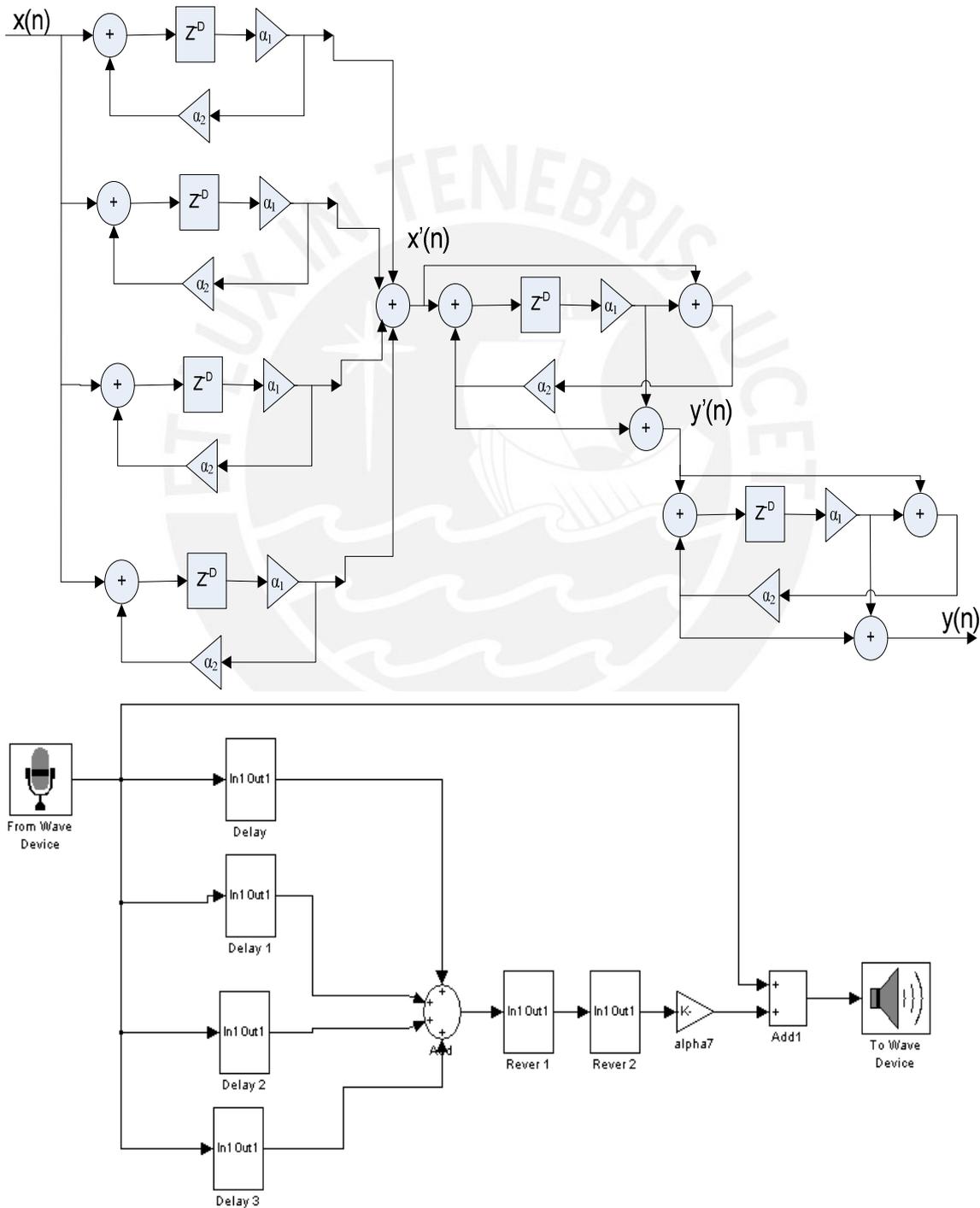


Figura 3.23. Reverberador de Schroeder y bloques de simulación [2]

Para simular el ambiente se usa 4 líneas de retardo básicas y poder tener los retardos espaciados de las paredes y el techo en una habitación; seguido de dos filtros pasa todo para hacer un decaimiento suave de las reflexiones acústicas de la habitación. El diagrama del filtro pasatodo (ver figura 3.24) [2] [29].

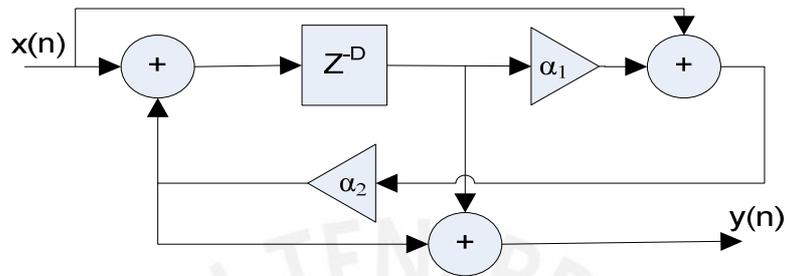


Figura 3.24. Filtro pasa todo (reverberador pasa todo)

Su función de transferencia está dada, para $\alpha_1 = -1$ por:

$$H(Z) = \frac{(\alpha_2 + Z^{-D})}{(1 + \alpha_2 * Z^{-D})} \tag{3}$$

3.2.4.2. Implementación

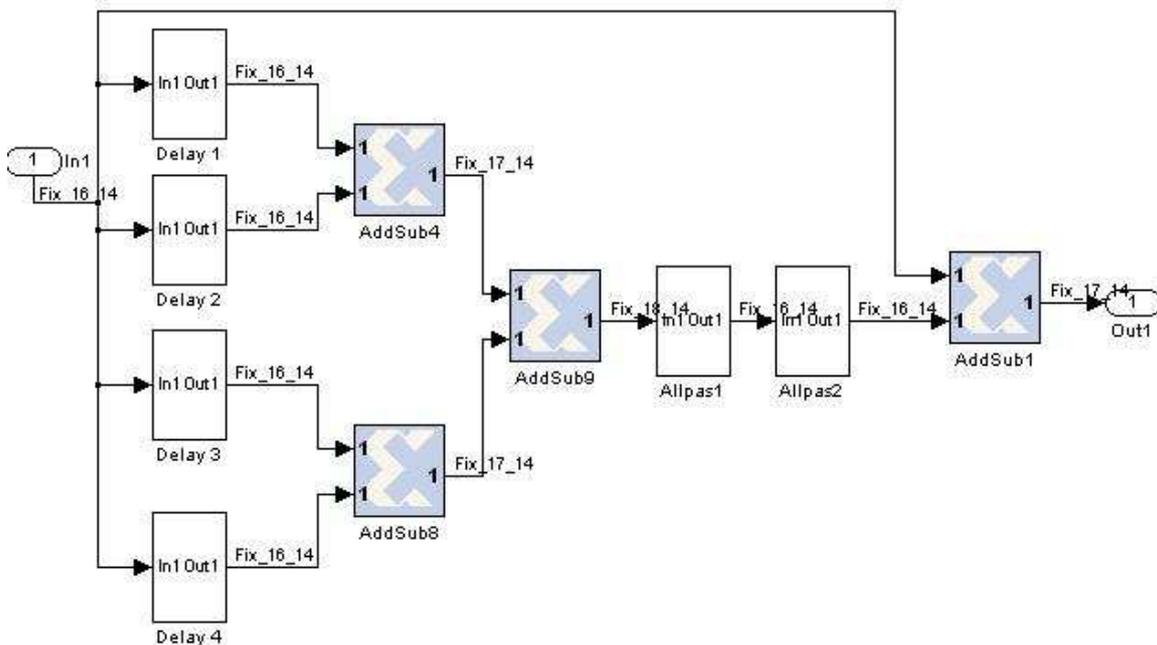


Figura 3.25. Modelo del reverberador de Schroeder con System Generator

El algoritmo consta de dos partes, la primera, consiste en una serie de 4 filtros basados en líneas de retardo básicas (Figura 3.8) que están implementados en el subsistema *Delay* (ver figura 3.26), estos son los encargados de generar los retardos a las muestras con un decaimiento exponencial de la amplitud. Para mantener la armonía y la buena respuesta en frecuencia, los retardos no deben ser muy largos con ello se crea un decaimiento suave resultando una densidad de eco lo suficientemente alta, además cumple la función de modelar la atenuación de las altas frecuencias debida al aire [2].

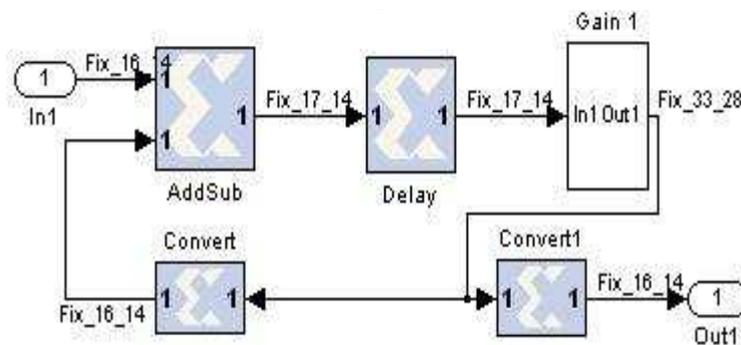


Figura 3.26. Subsistema *Delay*

Además, se usa dos filtros pasa todo, que se muestran en el subsistema *Allpas* (Figura 3.27), en serie los cuales tienen la propiedad de afectar la fase de la señal, permitiendo dar forma a los desvanecimientos [2].

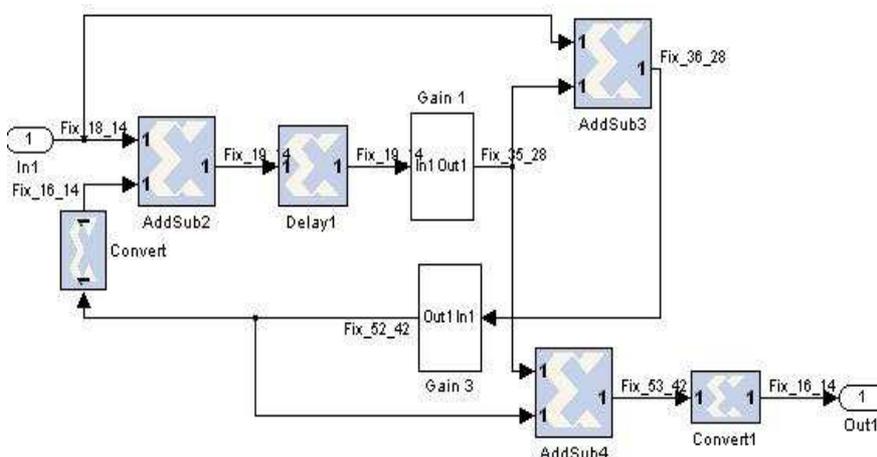


Figura 3.27. Subsistema *Allpas*

Debido al manejo de los datos se implementó las ganancias (a modo de amplificador) en el subsistema *Gain* que se muestra en la Figura 3.28.

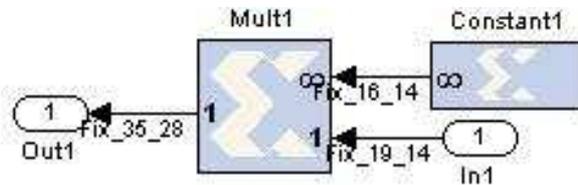


Figura 3.28. Subsistema Gain



CAPÍTULO 4

4. EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Los modelos planteados para la generación de efectos al sonido serán evaluados de forma analítica y de forma subjetiva.

4.1 Evaluación analítica de resultados

Este método se basará en el análisis de espectrogramas de magnitud, fase y visualización de la variación de la forma de onda comparando las señales de entrada con las de salida. Para hacer las pruebas de espectrogramas se usó Matlab y para la reproducción y visualización de la forma de onda, se usó el software Audacity versión 1.3 [33].

4.1.1 *Delay*

La Figura 4.1 muestra las formas de onda de la señal de entrada mono y la de salida en estéreo, El efecto *delay* genera un eco (repetición de la señal) en todas las frecuencias, el efecto eco es variado con los parámetros de configuración del algoritmo (en este caso se tiene un retraso de 0.20 segundos). Se observa en la forma de onda de salida que la señal está retrasada (se ve al comienzo de la onda con mayor claridad) como vemos, presenta un eco repetitivo igualmente espaciado en toda la señal como también se puede apreciar en los espectros de las señales.

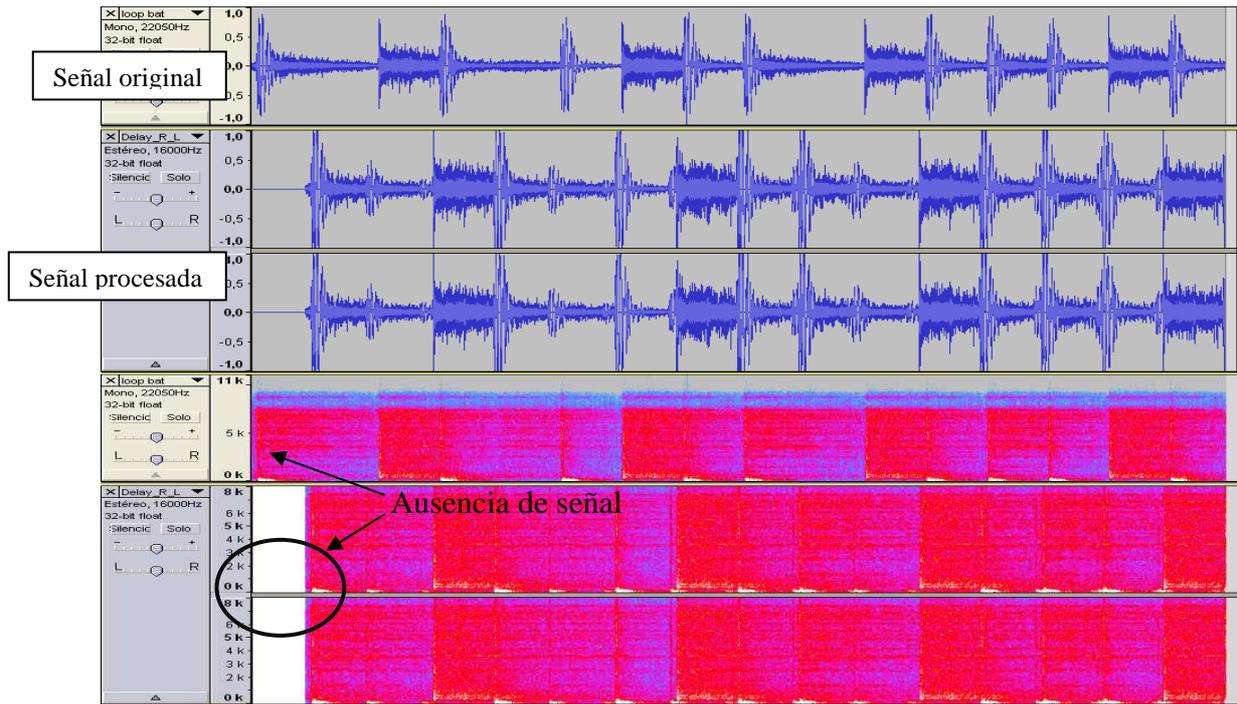


Figura 4.1. Forma de onda y espectrogramas de las señales de entrada y salida.

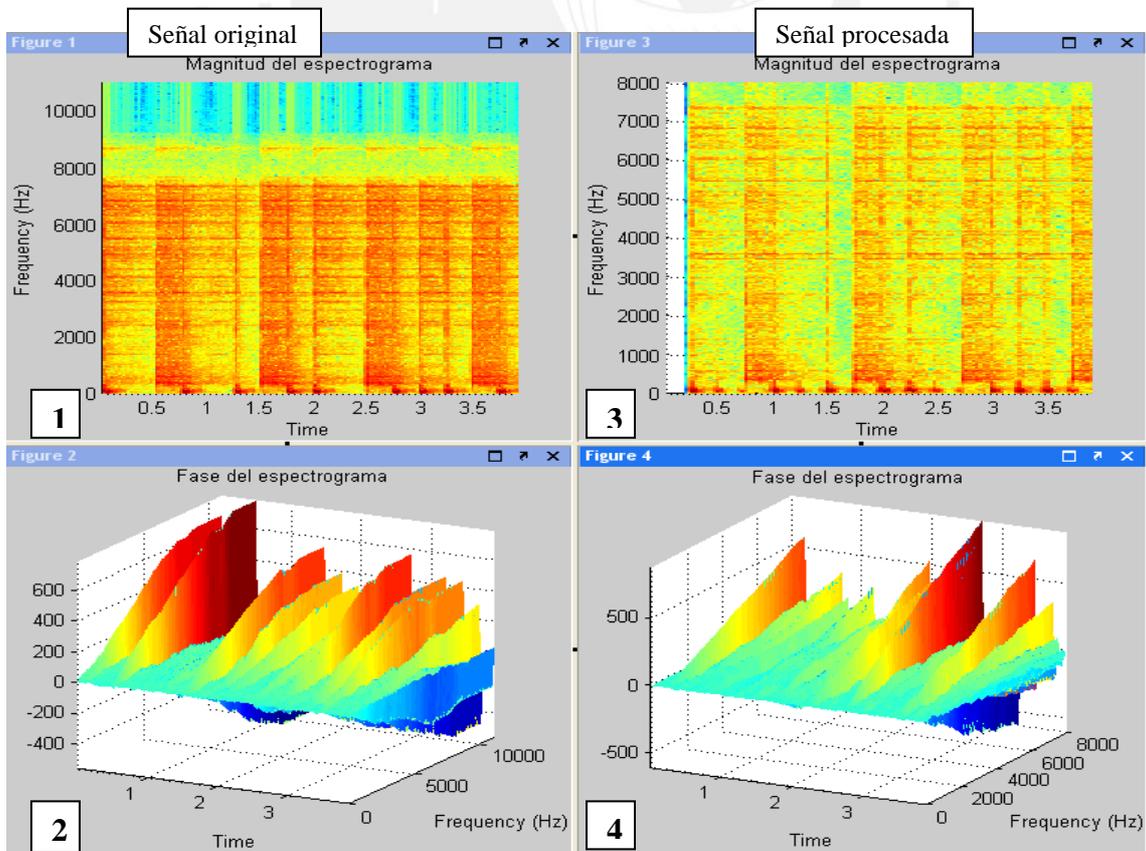


Figura 4.2. Espectrogramas de magnitud y de fase de las señales de entrada y salida

Las Figura 4.2 muestra los espectrogramas de magnitud y de fase de la señales de entrada (1,2) y salida (3,4), en magnitud podemos ver la intensidad del sonido en cada frecuencia como es alterada la potencia (color rojo) de la señal y si esta ha sido filtrada o no (tener en cuenta la escala de los gráficos).

Comparando los espectrogramas de la Figura 4.2 - 1 y 4.2 - 3, notamos el desfase del eco inicial (en Figura 4.2 - 3, sin datos al inicio) y las repeticiones o ecos igualmente espaciados a lo largo de toda la señal, además se ve la atenuación en el color rojo, esto indica que la potencia ha sido distribuida en todo el rango de frecuencias. Este resultado era el esperado, se quiere producir un eco en la señal sin alterar demasiado la potencia.

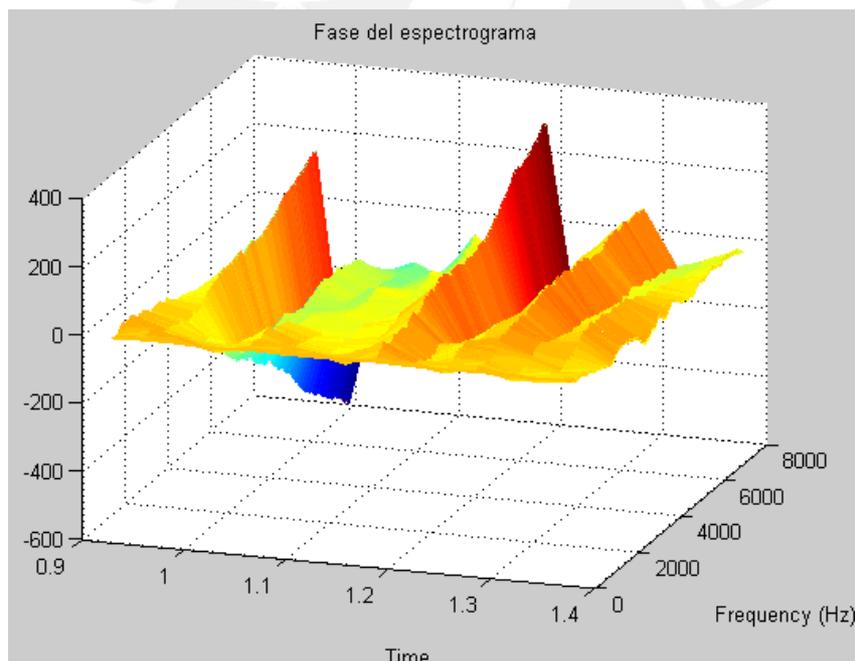


Figura 4.3. Fase de la señal de salida entre 0.85 y 1.4 seg.

En fase (figura 4.2 - 2 y 4.2 - 4) se ve el retardo del sonido en cada frecuencia y se busca mantener la linealidad de la fase. Para entender mejor veamos una señal cosenoidal:

$$\cos(\omega t + \phi) . \quad (4)$$

Factorizando ω para tener la misma unidad en el argumento, tenemos $\cos \omega(t + \phi / \omega)$ donde t es variable, entonces, su desplazamiento es el retardo y está dado por $retardo = \phi / \omega$ que también depende de la frecuencia $\omega = 2\pi f$. Lo que se busca es que todas las frecuencias tengan el mismo retardo de lo contrario habrá distorsión en la señal, entonces se quiere que $k = retardo = \phi / \omega$ (siendo k una constante) si el retardo es constante se tiene $\phi = \omega * k$ esta expresión se conoce como fase lineal, idealmente debería ser una recta en función de ω y la pendiente de fase da el retardo del sonido en cada frecuencia [15].

La Figura 4.3 muestra el espectrograma de fase de la señal de salida entre los segundos 0.9 a 1.4 donde se tiene a la señal con el eco, se observa que la linealidad se conserva con respecto a la señal original (figura 4.2 - 2) produciendo un eco que poco a poco se va atenuando. Lo que se busca es mantener la linealidad de la fase para no alterar la señal ni distorsionarla y los ecos conseguidos logran lo esperado.

4.1.2. Delay cruzado

Con el efecto delay cruzado se busca atenuar las altas frecuencias y producir ecos en las bajas frecuencias lo que nos serviría para instrumentos como: bombo de batería, bajo entre otros.

En la Figura 4.4 vemos las formas de onda y el espectrograma de la muestra, es notorio el resultado en la forma de onda, se ve que se tiene un eco atenuado por cada pico de frecuencia, los cuales se notan claramente (en el espectrograma) que están en toda la muestra. Además no se nota retardo a la salida como el efecto *delay* lo que

significa que no retarda toda la señal sino cada una de las bajas frecuencias manteniendo íntegra la muestra de audio.

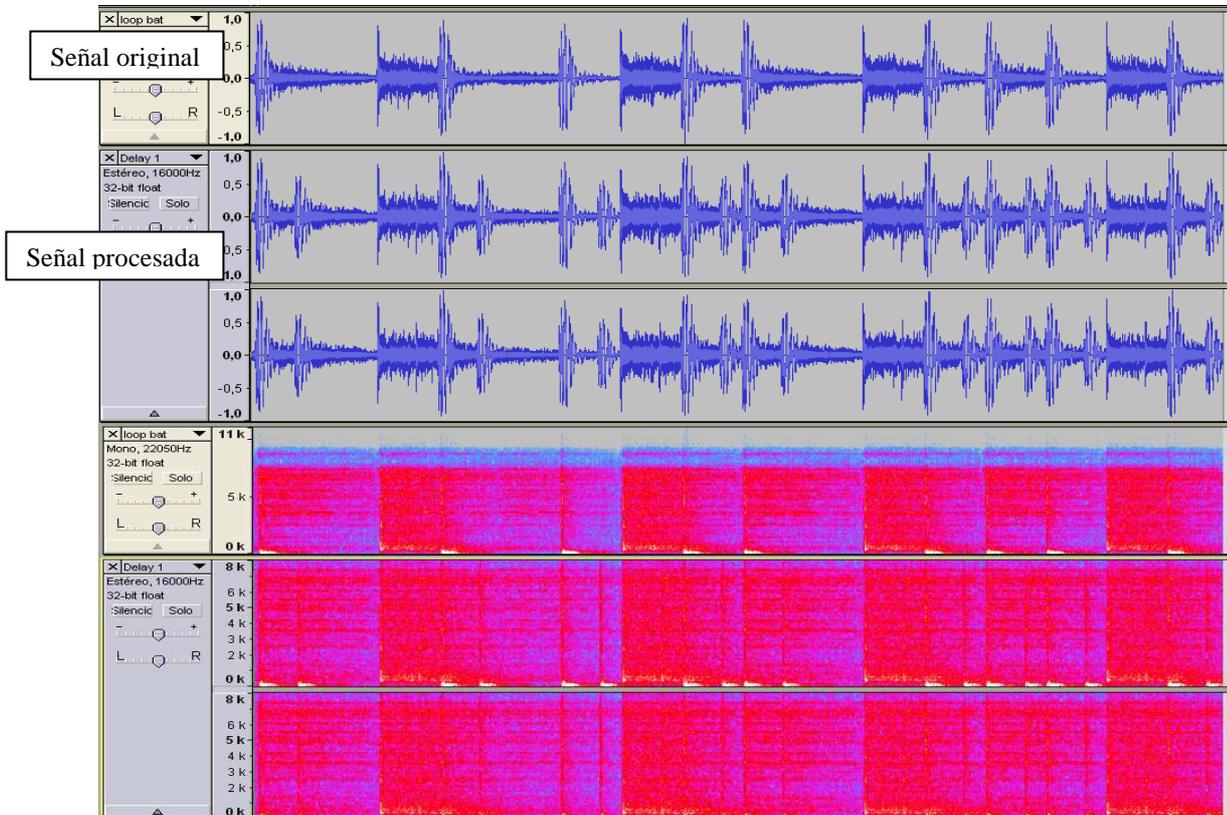


Figura 4.4. Forma de onda y espectrogramas de las señales de entrada y salida

La Figura 4.5 muestra el análisis de la magnitud y la fase de la señal original y la procesada. Es notorio el resultado del filtrado (Figura 4.5 - 1 y 4.5 - 3) en magnitud notamos que la potencia en las altas frecuencias se han atenuado y se producen los ecos el cual depende de la señal para mantener la armonía.

En fase se puede apreciar la linealidad de la fase en los picos (ver figura 4.5 - 2 y 4.5 - 4) de cada una de las frecuencias, como era de esperarse, no se retarda toda la señal sino que se producen repeticiones (ecos) por cada pico de frecuencia (ver figura 4,5).

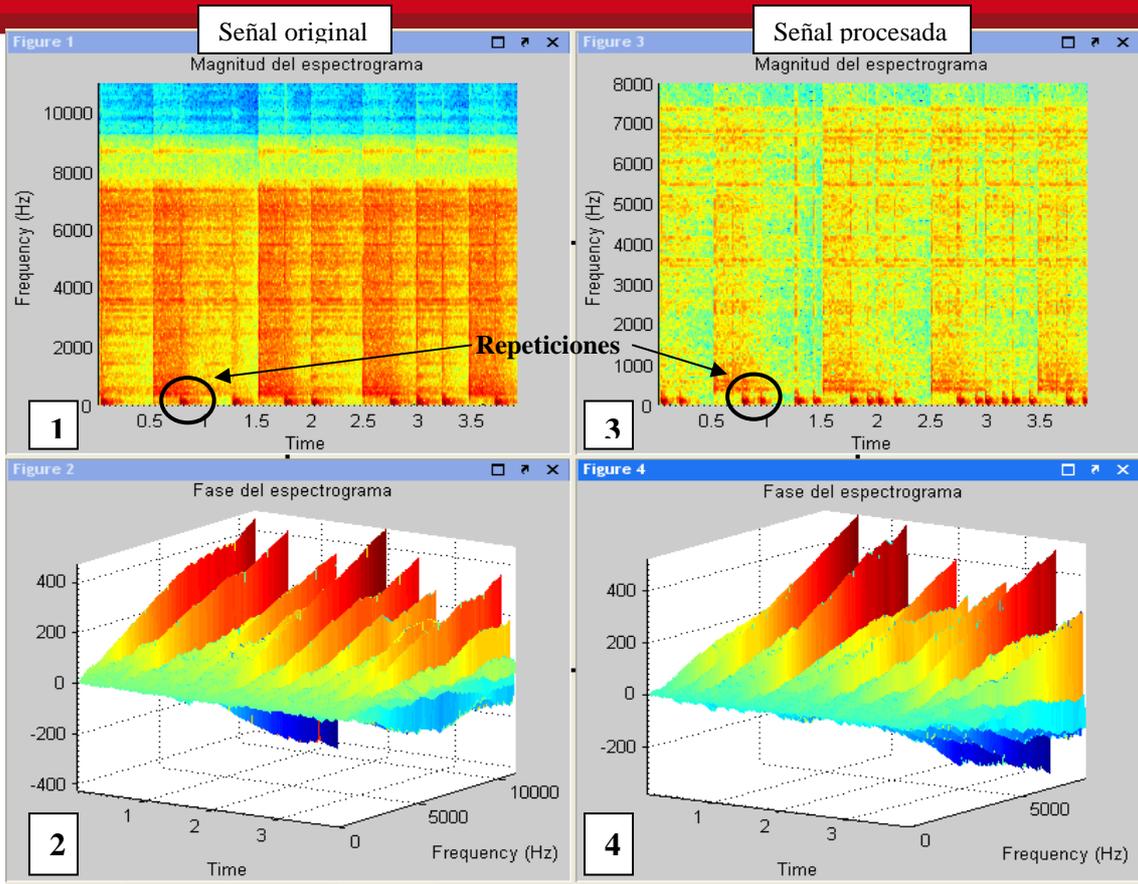


Figura 4.5. Espectrogramas de magnitud y de fase de las señales de entrada y salida

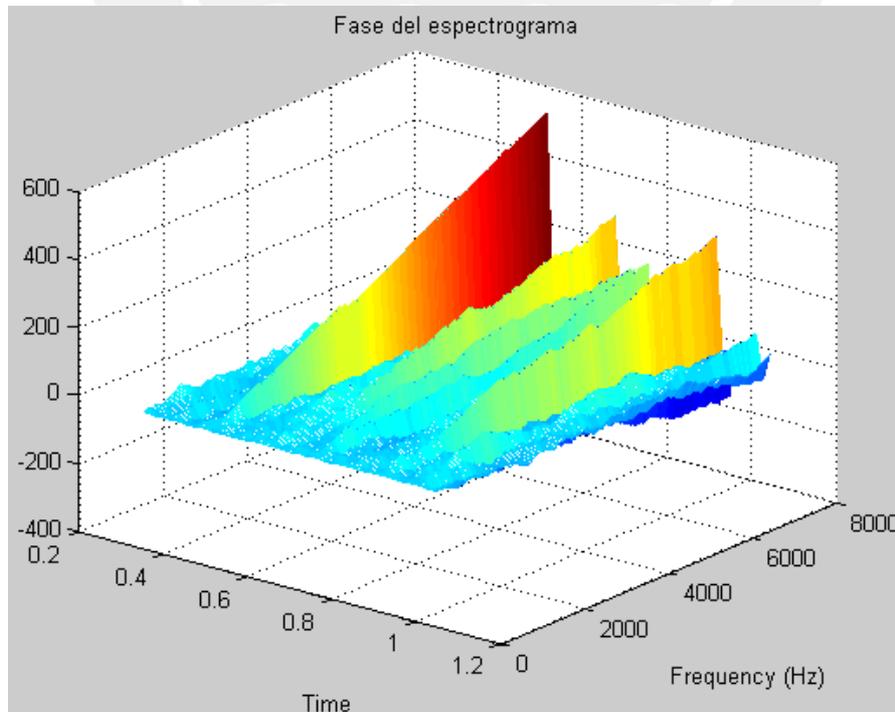


Figura 4.6. Fase de la señal de salida entre (0.5 y 1.2 seg)

La conservación de la linealidad en la fase nos indica que la señal ha sido bien filtrada, en la Figura 4.6 que analiza el tramo de 0.2 a 1.2 seg. Se nota el pico de la señal original (se conserva la linealidad en fase) y el retardo generado en baja frecuencia que poco a poco se va atenuando. Recordar que la pendiente de fase indica cuanto se ha retardado la señal, para mantener la armonía e integridad de sonido, esta tiene que ser constante en todas las frecuencias de lo contrario la señal se distorsiona.

4.1.3. Flanger

El efecto *flanger* se trata de un filtrado periódico (en forma de peine) de una serie de frecuencias determinada por el tiempo de retardo (0.5 milisegundos y 2Hz) este efecto se caracteriza por que crea un grupo de muestras igualmente espaciadas en el espectro de audio que se desplazarán armónicamente por el filtrado la señal de forma que se produce dicho efecto.

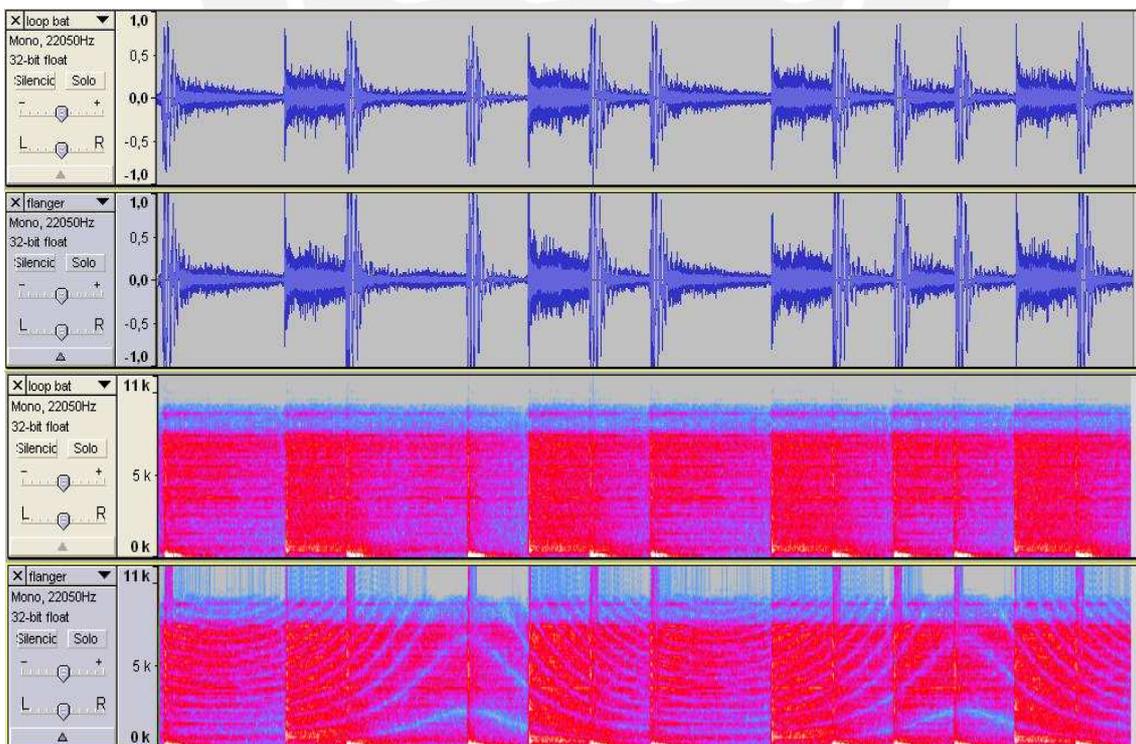


Figura 4.7. Forma de onda y espectrogramas de las señales de entrada y salida

El sonido de salida generado por este efecto no es muy notorio en la forma de onda (Figura 4.7), el efecto se percibe más en el espectro vemos que presenta líneas concéntricas debido al filtro en forma de peine.

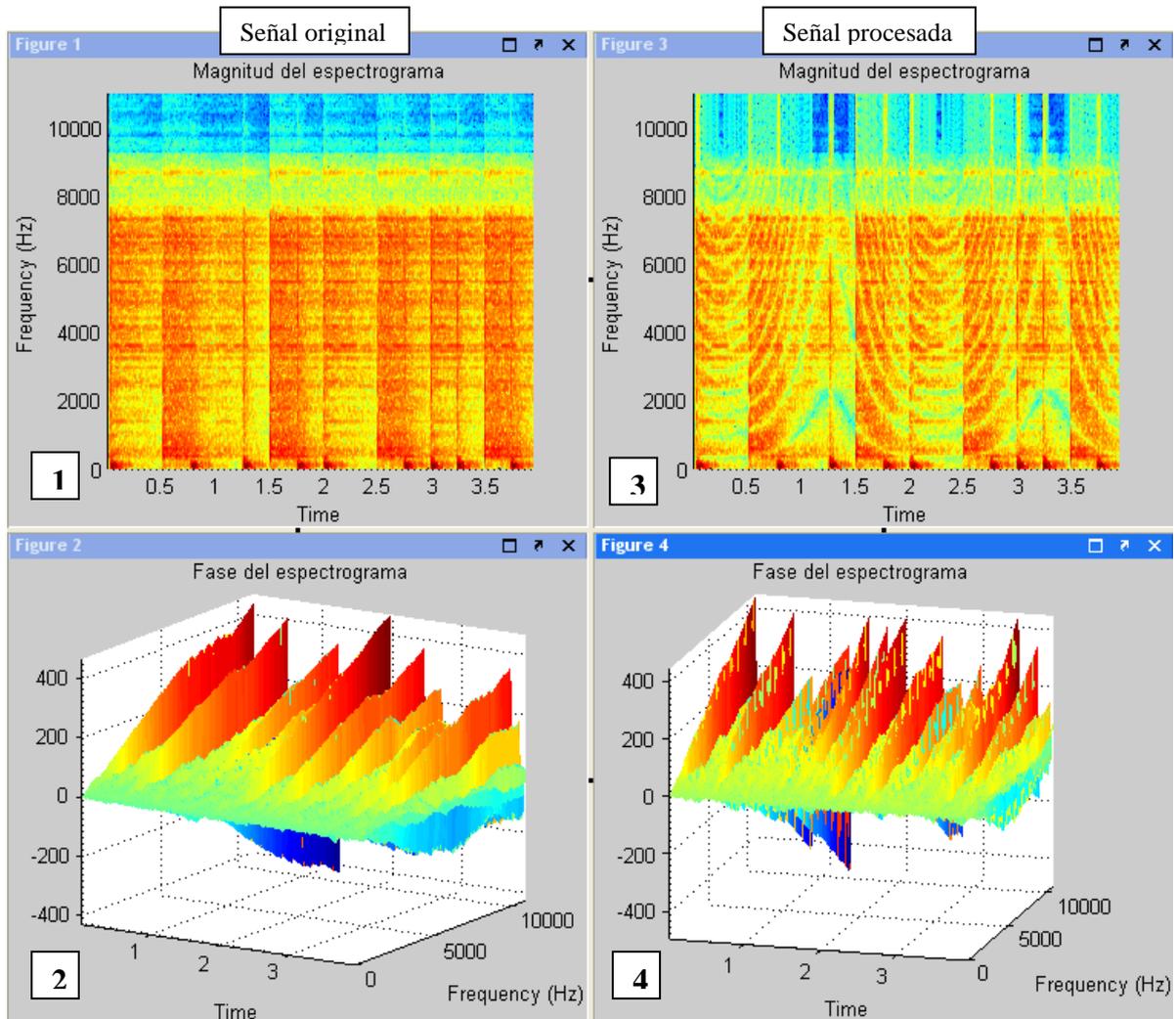


Figura 4.8. Espectrogramas de magnitud y de fase de las señales de entrada y salida

La Figura 4.8 muestra los espectros de magnitud y de fase; en magnitud de la señal de salida (Figura 4.8 - 3) vemos como el efecto del filtro afecta la potencia de la señal dándole una variación en forma de peine siendo característico de este efecto conservando la energía en todo el rango de frecuencias.

En fase (Figura 4.8 – 2 y 4.8 – 4) se observa que la linealidad de la fase se conserva (lo notamos en la pendiente de los gráficos de fase) y la pendiente de las curvas de fase no se altera demasiado, esto quiere decir que el algoritmo no produce retardos.

4.1.4. Reverberación

La reverberación auditivamente se caracteriza por una prolongación, a modo de “cola sonora”, que se añade al sonido original. La duración y la coloración tímbrica de esta cola dependen de la distancia entre el oyente y la fuente sonora y de la naturaleza de las superficies que reflejan el sonido [3].

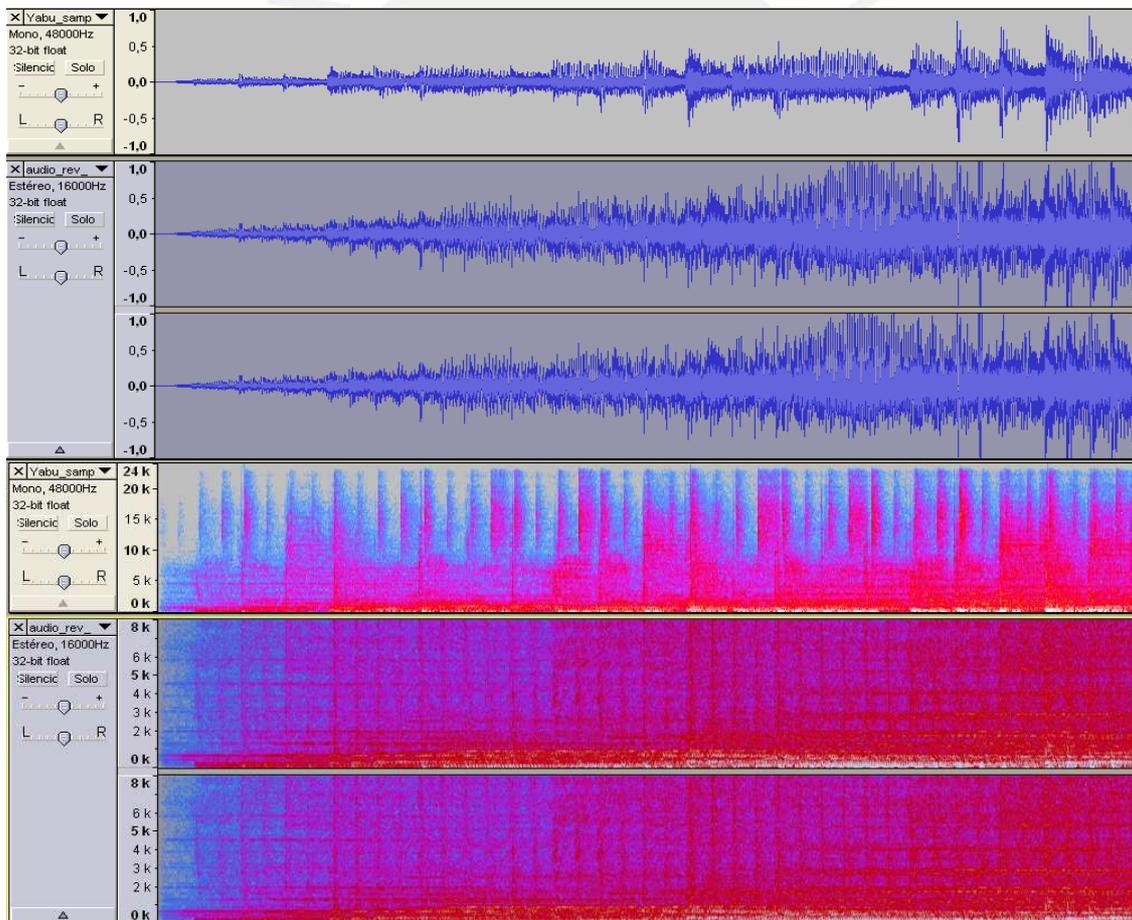


Figura 4.9. Forma de onda y espectrogramas de las señales de entrada y salida de reverberación

En la Figura 4.9 se puede notar como la señal es alterada en su forma de onda amplificándola sin llegar a distorsionarla, además notamos que las reflexiones armónicas producidas por los ecos van decayendo enriqueciendo la señal de salida.

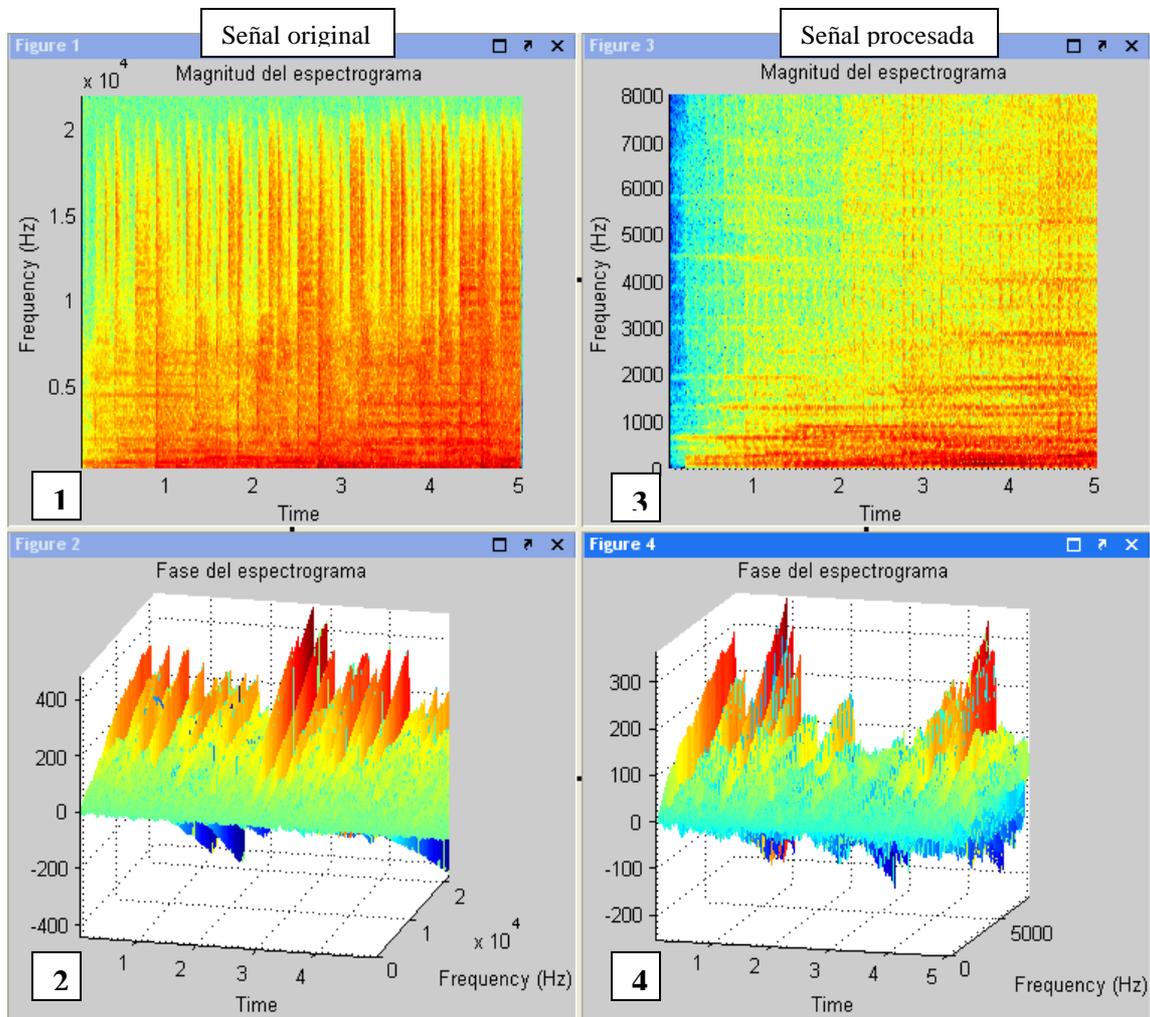


Figura 4.10. Espectrogramas de magnitud y de fase de las señales de entrada y salida

Los resultados son notorios en los espectrogramas (Figura 4.10 - 1 y 4.10 - 3) la potencia se distribuye en todas las frecuencias causado por la regeneración de la señal en salida por las reflexiones tempranas y tardías, a pesar que hay una amplificación de la señal, esta no altera la salida distorsionándola.

Por otro lado, la fase es alterada debido a las reflexiones que generan ecos controlados por los parámetros configurados en el algoritmo. La pendiente de fase es alterada pero no retarda mucho la salida manteniendo así el efecto característico de la reverberación.

4.2. Evaluación subjetiva de resultados

Los resultados del sistema dependen de la interpretación del oyente, dependiendo de cada persona se puede tener una percepción diferente de los resultados en otras palabras, el análisis de resultados se hará de forma subjetiva, para ello se tomó una encuesta a 25 personas (se les hizo escuchar los sonidos generados) del ambiente musical esperando su opinión en base a la experiencia sonora que ellos tengan, dentro de este grupo se cuenta con 20 músicos sin formación musical (músicos en base a su experiencia en el ambiente comercial musical) que forman parte del grupo 1 durante este proceso los 5 restantes son músicos de profesión (con estudios en música) y forman parte del grupo 2.

Se presentó una serie de 5 preguntas (ver Tabla 4.1) con las que se pretende obtener una apreciación subjetiva sobre los resultados del sistema. Estas preguntas están orientadas a adquirir información del aspecto tímbrico, sonoro y comparativo con otros equipos comerciales con los cuales trabajan en sus aplicaciones además se plantea un grado de aceptación del sistema en sus aplicaciones.

En la Figura 4.11 se muestra la gráfica, en promedio para los cuatro efectos, de los resultados obtenidos de la encuesta hecha al grupo 1. Como vemos la aceptación del resultado del sistema en la generación de efectos al sonido es aceptable; en la Tabla 4.2 se presenta el porcentaje de aceptación para cada efecto.

Tabla 4.1. Encuesta sonora

Encuesta sonora

De acuerdo a su apreciación marcar:

1– malo, 2 – regular, 3 – bueno, 4 – excelente, 5 – no percibe nada

En el orden:

Delay	Delay cruzado	Flanger	Reverb
-------	---------------	---------	--------

1. ¿Percibe la diferencia en el sonido original y el de salida?
2. ¿El sonido es agradable?
3. ¿Percibe el efecto generado al sonido?
4. Comparado con equipos que conoce, ¿Pueden, estos efectos, compararse con los implementados en estos equipos?
5. ¿Grado de aceptación de los efectos generados para sus aplicaciones?
6. Opiniones y/o sugerencias

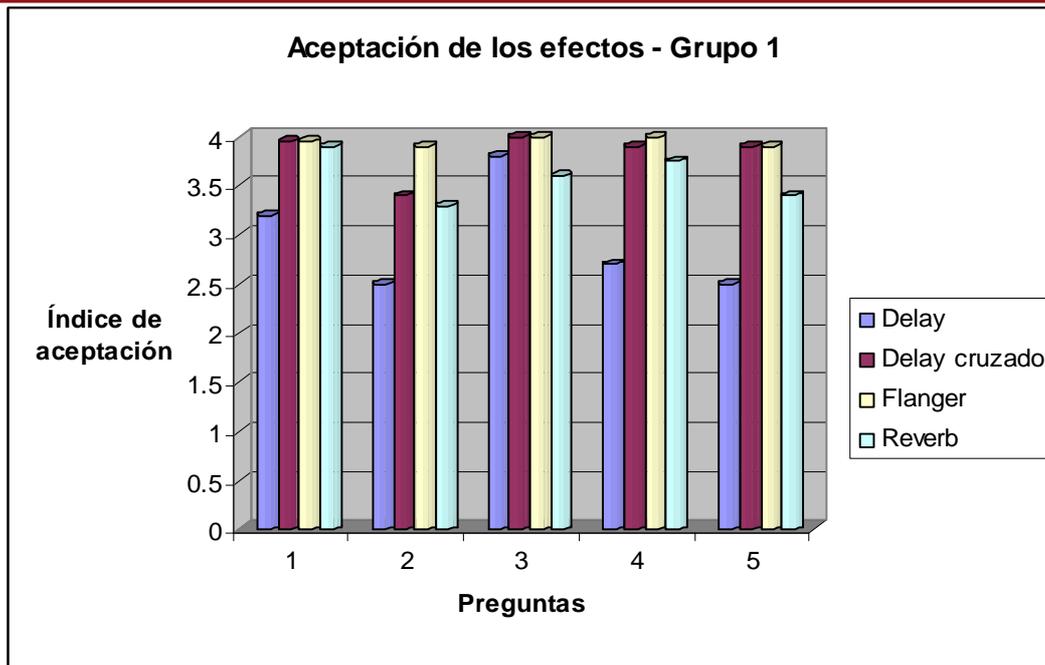


Figura 4.11. Grafica de resultados de la encuesta a los músicos en base a su experiencia – Grupo 1

A la pregunta 1 (¿Percibe la diferencia en el sonido original y el de salida?) se tiene que el efecto de *delay* cruzado y *flanger* alcanzan un 98.75 % de percepción entre la diferencia del sonido original y la salida; a la pregunta 2 (¿El sonido es agradable?) se tiene mejor aceptación por parte de los encuestados de 85 % del efecto *delay* cruzado a la pregunta 3 (¿Percibe el efecto generado al sonido?) los encuestados dieron una aceptación del 100 % a los efectos de *delay* cruzado y *flanger*; a la pregunta 4 (Comparado con equipos que conoce, ¿Pueden, estos efectos, compararse con los implementados en estos equipos?) dando el 100 % de aprobación para el efecto *flanger*; y finalmente a la pregunta 5 (¿Grado de aceptación de los efectos generados para sus aplicaciones?) los encuestados aceptaron en buen porcentaje los efectos de reverberación (en 85%), *delay* cruzado y *flanger* (ambos en 97.5 %) que serían aceptados para sus aplicaciones musicales.

Tabla 4.2. Resultados en promedio de cada pregunta en índices y porcentajes realizadas al grupo 1

Pregunta	Índices de aceptación				Porcentajes de aceptación			
	Delay	Delay cruzado	Flanger	Reverb	Delay	Delay cruzado	Flanger	Reverb
1	3.2	3.95	3.95	3.9	80.00%	98.75%	98.75%	97.50%
2	2.5	3.4	3.9	3.3	62.50%	85.00%	97.50%	82.50%
3	3.8	4	4	3.6	95.00%	100.00%	100.00%	90.00%
4	2.7	3.9	4	3.75	67.50%	97.50%	100.00%	93.75%
5	2.5	3.9	3.9	3.4	62.50%	97.50%	97.50%	85.00%

Finalmente los resultados obtenidos de la encuesta al grupo 2 muestran diferencias notables comparadas con las del grupo 1 debido al grado de análisis teórico realizado por los encuestados a las muestras de sonido.

La Figura 4.12 muestra los resultados promedio de las 5 preguntas y los índices de aceptación de cada uno de los efectos. Es notorio que el efecto delay presenta la menor aceptación por parte de los encuestados y el efecto flanger es el que es aceptado en mejor porcentaje.

Los porcentajes y los índices de aceptación se presentan en la Tabla 4.3, la pregunta 1, se tiene que los efectos delay cruzado, flanger y reverberación son diferenciados con un 90% de las señales originales; a la pregunta 2, el efecto *flanger* presentó un 100 % de aceptación como sonido agradable; a la pregunta 3, los encuestados dieron un 100% de aceptación a los efectos *delay* cruzado, *flanger*; a la pregunta 4, los efectos de *delay* cruzado y *flanger* son comparables con equipos ya implementados en un 90%; finalmente, a la pregunta 5 se dio una aceptación como parte de sus aplicaciones a los efectos de *delay* cruzado y *flanger* con un 90%.

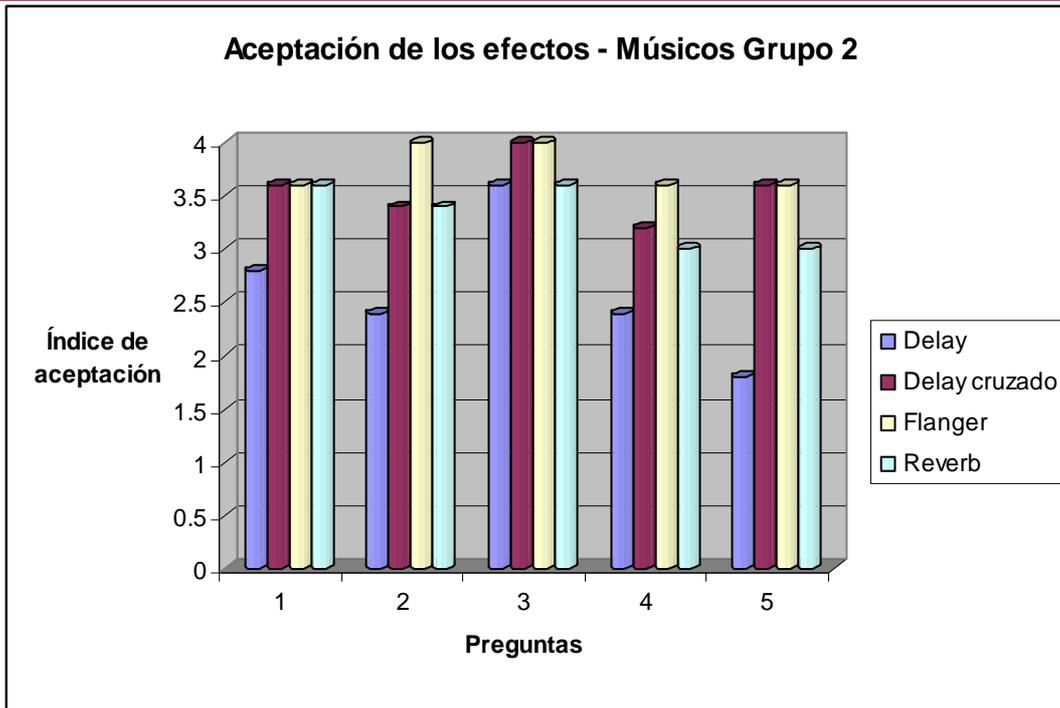


Figura 4.12. Gráfica de resultados de la encuesta a los músicos con formación musical – Grupo 2

Tabla 4.3. Resultados en promedio de cada pregunta en índices y porcentajes echas al grupo 2

Pregunt a	Índices de aceptación				Porcentajes de aceptación			
	Delay	Delay cruzado	Flanger	Reverb	Delay	Delay cruzado	Flanger	Reverb
1	2.8	3.6	3.6	3.6	70.00%	90.00%	90.00%	90.00%
2	2.4	3.4	4	3.4	60.00%	85.00%	100.00 %	85.00%
3	3.6	4	4	3.6	90.00%	100.00%	100.00 %	90.00%
4	2.4	3.2	3.6	3	60.00%	80.00%	90.00%	75.00%
5	1.8	3.6	3.6	3	45.00%	90.00%	90.00%	75.00%

Finalmente, de los comentarios y sugerencias obtenidas durante la encuesta, podemos resaltar lo siguiente:

- Debido a los diferentes parámetros de configuración de los efectos, éstos pueden variar demasiado y puede ser percibido de muchas maneras y podrían servir para diferentes aplicaciones sólo dependiendo de su configuración.
- El análisis de efectos ya configurados es muy difícil, porque se tiene que ver en que sería su aplicación y dependiendo de eso la aceptación o no por parte del músico.
- Se puede mejorar la configuración de cada parámetro en cada efecto y mejorar su efecto en el sonido. Por otro lado, muchas veces la aplicación requiere del efecto por ello resulta difícil dar un veredicto sobre si el efecto generado es bueno o malo.
- Se podría pensar en implementar otros algoritmos que mejoren la generación de los efectos.
- Se da una aceptación favorable en las aplicaciones que realizan los músicos en especial el efecto *delay* cruzado que puede servir mucho para géneros como el Rock.

CONCLUSIONES

- Como conclusión principal se obtiene que el sistema tiene un aprobación significativa y en especial el algoritmo de efecto *delay* cruzado que alcanza un 90% de aprobación por los involucrados en las pruebas, finalmente se puede concluir que el sistema si es realizable en base a la tecnología usada.
- Se logra conservar la integridad de la señal manteniendo la armonía y evitando que se distorsione logrando generar un sonido agradable al oyente.
- Se logró con éxito implementar los efectos de *delay*, *delay* cruzado y reverberación, cumpliendo los objetivos planteados inicialmente, obteniendo mayor aprobación en las pruebas realizadas el efecto *delay* cruzado.
- Dada su complejidad de implementación con la tecnología usada, el efecto *flanger* no se logró implementar, pero se obtienen todos los parámetros para su futura implementación gracias a las simulaciones realizadas.
- La configuración de cada efecto como el tiempo de retardo, la ganancia de la realimentación de cada bloque hace variar el efecto sonoro generado y con ello la manera de interpretar los resultados obtenidos del sistema que dependiendo del músico podría servir para diferentes aplicaciones.

- Se recoge de los involucrados en la encuesta aceptación de los efectos ya configurados para sus trabajos, sin embargo en muchas aplicaciones se requiere variar los parámetros de cada efecto para su uso.
- Como aporte a la industria, los resultados obtenidos de los encuestados, dan una gran aceptación a la tecnología y a los resultados obtenidos del sistema dándole aceptación en sus aplicaciones.



RECOMENDACIONES

- Para obtener una mejor perspectiva de los resultados se puede mejorar la configuración de los parámetros haciendo tablas de calibración para cada efecto y dependiendo de la aplicación que cada músico en particular lo requiera.
- Para futuros trabajos, se puede plantear la implementación de periféricos con los cuales se puedan variar los parámetros de configuración de los efectos dando libertad al músico para escoger el sonido que mejor se acomode a su aplicación.
- Se presenta todos los parámetros de configuración así como el modelo de implementación del efecto *flanger*, para lo cual se sugiere implementar una memoria en la cual se almacenen los coeficientes de la señal de baja frecuencia e ir leyendo los datos de manera cíclica para formar el LFO (Oscilador de Baja Frecuencia) y poder implementar el modelo de este efecto.
- Para mejorar el sistema se puede estudiar e implementar variaciones de los algoritmos propuestos usando la metodología que se presenta en este trabajo.
- Hacer una encuesta basada en los modelos estadísticos para mejorar la interpretación de los resultados y con ello indicar los diferentes factores que modifican la respuesta con mayor exactitud.

BIBLIOGRAFIA

- [1] GOMEZ, Emilia.
“Tonal Description of Music Audio Signals”. Tesis (Dtr.), Universitat Pompeu Fabra, Departamento de Tecnología, Barcelona, 2006.
- [2] SCHROEDER, Manfred.
“Natural Sounding artificial Reverberation”. Journal of the Audio Engineering Society, vol. 10, no.3, pp. 219-223, julio 1962.
- [3] TAKASHI, S. TSUTOMU, M, TSUTOMU, H. SABURO H.
“A Music Synthesizer on FPGA”. G. Brebner and R. Woods (Eds.), FPL2001, LNCS 2147, pp 377–387, 2001.
- [4] ARIAS, Miguel.
“Introducción a VHDL y dispositivos FPGA”. Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica, Puebla, 2005.
- [5] SENANES, Gabriel.
“4x4 = rock”. Buenos Aires. Grupo editor de Buenos Aires, 1980.
- [6] CHION, Michel.
“El sonido: Música, cine, literatura...”. Barcelona. Paidós, 1999.

- [7] SCHAEFFER, Pierre.
“Tratado de los objetos musicales”. [Trad.] Araceli Cabezón de Diego.
Madrid. Alianza Editorial, 1988.
- [8] PUCKETTE, Miller.
“Theory and techniques of electronic music”. San Diego, University of
California, 2007.
- [9] SoniMax.
Equipos de sonido SoniMax
<http://www.sonimax-bcn.com/tienda/index.php/cPath/47>
- [10] BONELLO, Oscar.
“Audio profesional”. Buenos Aires. Arbo Editores, 1991.
- [11] Xilinx.
“Virtex-II Pro platform fpga”. User guide, 2002.
- [12] Behringer.
Equipos de sonido.
<http://www.behringer.com/>
- [13] Xilinx FPGAs
<http://www.xilinx.com/>
- [14] Yamaha
Sonido en vivo.
<http://www.yamaha.com/proaudio/home.html?CTID=227500>

- [15] ROCCHESO, Davide.
“Introduction to sound processing”. Università di Verona, Departamento de Informática, Verona, 2003.
- [16] SACCO, Antonio.
“Apuntes sobre el sonido digital”. Universidad Nacional de La Plata, Argentina, pp. 1-8, 2004.
- [17] Production Audio
Sonido e iluminación universal
<http://www.produccionaudio.com/article.php?a=460>
- [18] Xilinx.
“Xilinx System Generator for DSP”. Versión 8.1, User's Guide, 2006.
- [19] GLEN, Ballou.
“Handbook for Sound Engineers”. Missouri. Focal Press, 2002.
- [20] VORLANDER, Michael.
“Auralization: Fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality”. Berlin. Springer, 2007.
- [21] HERNÁNDEZ, J. VÁZQUEZ, C. DUQUE, E.
“Procesado de efectos de audio”. Universidad de las Palmas de Gran Canaria, Madrid, España, 2002.
- [22] CAESAR, Rodolfo.

- "The Composition of Electroacoustic Music"*. Tesis (Dtr.), University of East Anglia, Departamento de Tecnología, Inglaterra, 1992.
- [23] SERGI, Jordà.
"Música e Inteligencia Artificial". Music Technology, Barcelona, 1990.
- [24] POUSSEUR, Henri (a cura Di).
"La Musica Elettronica". Prefazione di Luciano Berio 323, Milán, 1976.
- [25] AHMED, Elhossini. SHAWKI, Areibi. ROBERT, Dony.
"An FPGA Implementation of the LMS Adaptive Filter for Audio Processing". Reconfigurable Computing and FPGAs IEEE International Conference, San Luis Potosi, Mexico, 2006.
- [26] YANG, Dai Tracy. KYRIAKAKIS, Chris. JAY Kuo, C.-C.
"High-fidelity multichannel audio coding". s.l, EURASIP Book Series on Signal Processing & Communications, 2006.
- [27] KYRIAKAKIS, Chris. BHARITKAR, Sunil.
"Immersive audio signal processing". Berlin. Springer, 2006.
- [28] KYRIAKAKIS, Chris.
"Fundamental and Technological Limitations of Immersive Audio Systems". Proceedings of the IEEE, vol. 86, no. 5, pp. 941-951, mayo 1998.
- [29] YOST, William. POPPER, Arthur. FAY, Richard [ed.].
"Springer handbook of auditory research". New York. Springer, vol. 29, Auditory perception of sounds, 2008.

- [30] RAUHALA, J. LEHTONEN, H. VÄLIMÄKI, V.
"Toward Next-Generation Digital Keyboard Instruments". IEEE Signal Processing Magazine, 12-20 pp, 2007.
- [31] TAKASHI, S. TSUTOMU, M. TSUTOMU, H. SABURO, H.
"Field programmable logic and applications". International conference, Belfast, Northern Ireland, 2001.
- [32] MOORER, James.
"About this reverberation business". Computer Music Journal, Vol. 3, no. 2, pp. 13-28, 1979.
- [33] AUDACITY version 1,3.
Equipo Audacity, Universidad de Carnegie Mellon,
<http://audacity.sourceforge.net/>

ANEXOS

Los archivos se adjuntan en el CD:

1. Documentación final
2. Desarrollo
3. Pruebas
4. Hojas de datos
5. Documentación extra

