

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

DISEÑO DE UN REVERBERADOR DIGITAL

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

JONATHAN CARRASCO SAAVEDRA

ASESOR: Jorge Néstor Moreno Ruiz

Lima, Noviembre de 2018

Agradecimientos

Doy gracias a Dios por la persona que soy,
a mi madre por enseñarme con su ejemplo que
nunca es tarde para cumplir las metas trazadas,
a mi padre, mi hermano, y mi esposa por
acompañarme en este proceso alentándome y
confiando en mi capacidad profesional,
a mi asesor por la paciencia y buena disposición,
y a todos mis profesores, compañeros, colegas,
amigos y familiares que con sus palabras y
acciones me inspiran a seguir mejorando.

RESUMEN

La presente tesis pretende demostrar que es posible diseñar un reverberador digital que permita controlar el tiempo de reverberación de forma eficiente utilizando algoritmos digitales desarrollados bajo un enfoque sensorial, que pueda brindar al oyente una sensación psicoacústica satisfactoria, y que sirva como base para brindar en el futuro una alternativa al mercado de procesadores de sonido.

Entendemos por reverberación a la persistencia del sonido debido a las múltiples reflexiones y al decaimiento de las ondas estacionarias del cuarto después que la fuente ha dejado de emitir sonido. Este fenómeno acústico otorga mayor belleza a expresiones sonoras como la música y el canto, y la existencia de los reverberadores tiene como objetivo imitar esa característica acústica para agregársela a un sonido que carezca de ella.

A lo largo de la historia se han desarrollado reverberadores electromecánicos, electrónicos con tecnología analógica, y en las últimas décadas los reverberadores digitales están marcando la tendencia gracias al gran avance que ha tenido el procesamiento digital de audio.

Para el desarrollo de esta tesis, ha sido necesaria la comprensión del fenómeno acústico de la reverberación y de las principales técnicas de procesamiento digital de señales que permiten el modelamiento digital del reverberador.

Finalmente con el diseño del reverberador se demostró que es posible controlar el tiempo de reverberación manteniendo la calidad en la percepción del sonido procesado.

ÍNDICE

RESUMEN	i
ÍNDICE	ii
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1 USO DE PROCESADORES DE REVERBERACIÓN	2
1.1. Entorno general.....	3
1.1.1. Tendencia musical.....	3
1.1.2. Tendencia tecnológica.....	3
1.1.3. Tendencia de efectos de sonido.	3
1.2. Entorno específico	4
1.2.1. Demanda.....	4
1.2.2. Fabricantes	4
1.2.3. Abastecedores	4
1.3. Entorno organizacional	5
1.3.1. Usuarios	5
1.3.2. Tecnología	5
1.3.3. Complejidad	5
1.4. Proceso para usar un reverberador.....	6
1.4.1. Descripción del proceso	7
1.4.2. Análisis del proceso.....	7
1.5. Declaración de la Problemática	9
CAPÍTULO 2 REVERBERADORES BASADOS EN TECNOLOGÍA DIGITAL	10
2.1. ESTADO DEL ARTE.....	11
2.1.1. Presentación del Asunto de Estudio	11
2.1.2. El Estado de la Investigación	12
2.1.3. Síntesis sobre el Asunto de Estudio.....	21
2.2. Señal	22
2.2.1. Señal Analógica	22
2.2.2. Señal Digital.....	22
2.3. Reverberación	24
2.3.1. Producción acústica.....	24
2.3.2. Producción digital.....	24
2.4. Matlab.....	25
2.4.1. Matlab Guide.....	25
2.5. Modelo Teórico.....	26
2.5.1. Descripción	27
2.5.2. Indicadores.....	28

CAPÍTULO 3 PLANTEAMIENTOS PARA EL DISEÑO DE UN REVERBERADOR DIGITAL	31
3.1. FUNDAMENTACIÓN	32
3.1.1. Fundamentación teórico académica	32
3.1.2. Fundamentación relacionada a la Realidad.....	32
3.1.3. Fundamentación personal	32
3.2. HIPÓTESIS	33
3.2.1. Hipótesis Principal	33
3.2.2. Hipótesis Secundarias	33
3.3. OBJETIVOS	34
3.3.1. Objetivo General	34
3.3.2. Objetivos Específicos	34
3.4. METODOLOGÍA DE LA IMPLEMENTACIÓN.....	35
CAPÍTULO 4 DISEÑO DEL REVERBERADOR DIGITAL BASADO EN ALGORITMOS DE ENFOQUE SENSORIAL	36
4.1. Diseño de un Reverberador digital: Enfoque físico vs enfoque sensorial	37
4.2. Reflexiones tempranas y reverberación tardía.....	39
4.3. Características del algoritmo de reflexiones tempranas binaural propuesto por Griesinger.....	40
4.3.1. Diagrama de Bloques para sistemas discretos en el tiempo.....	40
4.3.2. Filtro Pasabajo de un polo	41
4.3.3. Función de transferencia relativa a la cabeza	42
4.3.4. Características modelo propuesto por Griesinger	43
4.4. Elementos y Características del algoritmo de reverberación propuesto por Schroeder.....	44
4.4.1. Tiempo de reverberación de un Filtro Peine:.....	44
4.4.2. Respuesta en frecuencia de un Filtro Peine	46
4.4.3. Características del Filtro Pasatodo	46
4.4.4. Características del reverberador propuesto por Schroeder.....	48
4.4.5. Adaptación Estéreo del Reverberador de Shroeder	49
4.5. Diseño integral del Reverberador Digital.....	51
4.6. Estructura y componentes de la Interfaz gráfica	52
4.7. Funciones Matlab del Reverberador Digital	54
4.7.1. FUNCIÓN FILTRO PASABAJOS DE UN POLO	55
4.7.2. FUNCIÓN FILTRO PEINE.....	56
4.7.3. FUNCIÓN FILTRO PASATODO	57
4.7.4. FUNCIÓN REFLEXIONES TEMPRANAS	58
4.7.5. FUNCIÓN REFLEXIONES TARDÍAS	59
4.7.6. PROGRAMA PRINCIPAL DEL REVERBERADOR DIGITAL	60

4.8. Pruebas en el Laboratorio de Electroacústica.....	61
4.8.1. Preparación para las pruebas en el Laboratorio.....	61
4.8.2. Descripción y alcance de las pruebas.....	61
4.8.3. Resultado de las pruebas.....	62
CONCLUSIONES.....	64
RECOMENDACIONES.....	65
BIBLIOGRAFÍA.....	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Diagrama de flujo del proceso de uso de un reverberador	6
Figura 2.1 Diagrama y Respuesta en el tiempo del Filtro Peine	12
Figura 2.2 Diagrama y Respuesta en el tiempo del Filtro Pasa-Todo.....	13
Figura 2.3 Diseño de Schroeder.....	13
Figura 2.4 Representación gráfica de la respuesta al impulso.....	14
Figura 2.5 Respuesta al impulso.....	15
Figura 2.6 Medición de respuesta al impulso con barridos senoidales.....	16
Figura 2.7 Medición de respuesta al impulso con señales impulsivas.....	16
Figura 2.9 ALESIS MICROVERB 4.....	17
Figura 2.8 BEHRINGER VIRTUALIZER 3D FX2000.....	18
Figura 2.10 YAMAHA SPX2000.....	18
Figura 2.11 Procesador M3000 de TC Electronic.....	19
Figura 2.12 Vista de la Unidad Plate(Lámina) del Paquete CSR de IK Multimedia.....	20
Figura 2.13 Mapa conceptual del Modelo Teórico.....	26
Figura 2.14 Tabla del Tiempo de reverberación para cada tipo de fuente.....	28
Figura 4.1 Ecograma: Gráfico de intensidad de la reflexión en función del tiempo....	39
Figura 4.2 Ejemplo de Diagrama de Bloques.....	40
Figura 4.3 Funcionamiento de un Filtro pasabajo de un polo.....	41
Figura 4.4 Filtro Pasabajo de un polo, normalizado.....	41
Figura 4.5 Algoritmo de reflexiones tempranas binaural [Griesinger, 1997].....	43
Figura 4.6 Diagrama de bloques y respuesta en el tiempo del filtro peine	44
Figura 4.7 Respuesta en el tiempo de un Filtro Peine graficado en Matlab.....	45
Figura 4.8 Respuesta en frecuencia de un Filtro Peine graficado en Matlab.....	46
Figura 4.9 Diagrama de Bloques y Respuesta en el tiempo de un filtro Pasatodo....	47
Figura 4.10 Respuesta en el tiempo y en frecuencia de un filtro pasatodo	48
Figura 4.11 Reverberador de Schroeder.....	48
Figura 4.12 Modelo de Schroeder modificado para obtener una salida stereo	50
Figura 4.13 Diagrama de la Arquitectura del Reverberador Digital.....	51
Figura 4.14 Interfaz gráfica del Reverberador Digital en MATLAB-GUIDE.....	52
Figura 4.15 Previsualización de respuesta en el tiempo	62
Figura 4.16 Resultados de prueba de 2 segundos de reverberación.....	63
Figura 4.17 Resultados de prueba de 4 segundos de reverberación.....	63

INTRODUCCIÓN

En estos tiempos la cantidad de aficionados a la música y el sonido ha ido aumentando progresivamente, y así surge para ellos la necesidad de agregar efectos como la reverberación para que sus producciones resulten más atractivas. Sin embargo, en el contexto actual, se presentan dos limitaciones importantes. Por un lado, al ser los equipos importados, el precio de estos procesadores es alto, y por otro lado, aquellos procesadores de precio moderado presentan limitaciones en cuanto a la diversidad de efectos de reverberación que se pueden agregar.

Es por ello que el estudio de la reverberación como efecto de sonido que puede agregarse a una línea de audio a través del procesamiento digital de señales, contribuye por un lado a obtener nuevas alternativas además de las ya existentes, y por otro lado, abre las puertas para futuras investigaciones y desarrollos de nuevos efectos que tengan como base el procesamiento digital de sonido y el conocimiento de los principios acústicos que gobiernan dichos efectos.

Dado que ya se ha visto que existe una creciente demanda por procesadores de reverberación, pero la realidad nacional es que no todas las personas aficionadas pueden acceder a los procesadores actuales debido al compromiso precio/calidad, entonces el diseño de un reverberador digital será la base sobre la cual se podrá otorgar una alternativa al mercado peruano de un procesador capaz de conseguir efectos de muy buena calidad combinado con un precio accesible a la mayoría de personas.

Finalmente, el objetivo de esta tesis es el diseño un reverberador digital que pueda ser ejecutado en una computadora y que estará basado en la utilización adecuada de algoritmos ya existentes, teniendo en cuenta el aspecto matemático y la percepción subjetiva humana, y para tal fin se requerirá un entendimiento sólido de la naturaleza del fenómeno acústico de la reverberación y de las técnicas de procesamiento digital de señales aplicado al audio.

CAPÍTULO 1

USO DE PROCESADORES DE REVERBERACIÓN

Antes de hablar del diseño de un procesador de reverberación, es importante conocer todo aquello relacionado a su utilización y entender cuáles son los factores de influencia. Se empezará tratando sobre el entorno general que sirve para ubicar en qué contexto mundial se da el fenómeno del uso de los procesadores de reverberación. Luego se tratará sobre el entorno específico, que se refiere a los factores del mercado que influyen sobre nuestro objeto de estudio, y finalmente el entorno organizacional que son los agentes que influyen directamente en el uso de los reverberadores.

Luego de ver todo aquello que afecta externamente al uso de los procesadores de reverberación se hará una descripción del procedimiento para usar estos equipos seguido por un análisis de los detalles que podrían representar dificultades.

El capítulo se concluirá con la declaración del marco problemático, donde se enunciará de forma concisa la problemática implicada al uso actual de los reverberadores, lo cual es la base para entender a qué solución debería contribuir el desarrollo de esta investigación.

1.1. Entorno general

Existe una serie de factores a nivel global que influyen sobre la utilización de los procesadores de reverberación por parte de distintos tipos de usuario. A continuación se citan las principales.

1.1.1. Tendencia musical

Desde la aparición del procesamiento digital de sonido, es cada vez más común encontrar que las canciones de los distintos artistas no se limitan a grabar la voz y mezclarla con el fondo instrumental, sino que se agregan distintos tipos de efectos sonoros que le aportan riqueza a la pieza musical para mayor disfrute por parte de los oyentes. Asimismo, la música electrónica ha continuado difundiéndose y cada vez con efectos más atractivos.

1.1.2. Tendencia tecnológica.

En lo que se refiere al avance tecnológico, la tendencia observable es que los dispositivos que usamos para distintas tareas se vuelvan cada vez más portátiles, es decir más fáciles de transportar, más livianos, más pequeños, y más eficientes. Por lo tanto, cualquier innovación tecnológica debería apuntar a estas características.

1.1.3. Tendencia de efectos de sonido.

En el mundo del procesamiento digital de audio, las principales empresas del mercado continúan investigando cómo obtener nuevos efectos sonoros y cómo optimizar los algoritmos de los efectos ya existentes para proporcionarle al usuario cada vez más variedad de opciones y con mayor calidad. Un ejemplo de esto es la utilización del audio multicanal para darle al oyente el efecto de tridimensionalidad del sonido percibido, lo cual es una técnica muy usada en Europa y que próximamente se difundirá con mayor fuerza en América Latina.

1.2. Entorno específico

Por otro lado, existen factores relacionados directamente con el mercado, que también tienen influencia directa sobre el uso de los procesadores de reverberación.

1.2.1. Demanda

Es posible percibir que existe aumento de aficionados a la música y asimismo al incremento de personas que se dedican al negocio de brindar servicios musicales para shows en vivo, grabación, edición, etc.

1.2.2. Fabricantes

Entre las marcas más conocidas en el medio limeño podemos encontrar algunas como Behringer, Alesis, TC Electronics y Yamaha.

1.2.3. Abastecedores

Los equipos procesadores de audio se pueden conseguir en tiendas especializadas para estos fines, donde además uno puede encontrar diversos tipos de micrófonos, amplificadores, ecualizadores, y más.

1.3. Entorno organizacional

Finalmente, ciertos factores están directamente ligados al uso de procesadores de reverberación y estos se detallan a continuación.

1.3.1. Usuarios

Las personas que suelen utilizar estos equipos son de diversa índole. Por un lado se encuentran las orquestas, para las cuales los procesadores de audio son trascendentales para brindar un show atractivo. Tenemos también ciertos negocios que se dedican a prestar en alquiler estos equipos para usuarios particulares que los deseen solo por un plazo limitado. Los músicos particulares ven en estos procesadores, un recurso para expandir aún más su arte consiguiendo sonidos que de otra forma les resultaría muy difícil conseguir. Los investigadores del audio en cualquiera de sus facetas, encuentran en estos procesadores un instrumento más con el que se puede realizar pruebas para desarrollar una nueva tecnología o implementar un sistema más complejo que satisfaga una necesidad en particular.

1.3.2. Tecnología

La tecnología utilizada en procesadores de audio, es netamente importada. Las marcas mencionadas como fabricantes son todas del extranjero y hasta el momento no existe una marca peruana conocida de procesamiento digital de audio.

1.3.3. Complejidad

La tendencia es que los procesadores sean fáciles de instalar y de usar. Para ello se trata de que la interfaz sea amigable y los parámetros sean sencillos de modificar. Así más personas pueden hacer uso ellos. A pesar de que la interfaz luce sencilla, en algunos procesadores los algoritmos internos de funcionamiento pueden alcanzar una complejidad muy elevada que a su vez permite obtener una mejor calidad del sonido.

1.4. Proceso para usar un reverberador

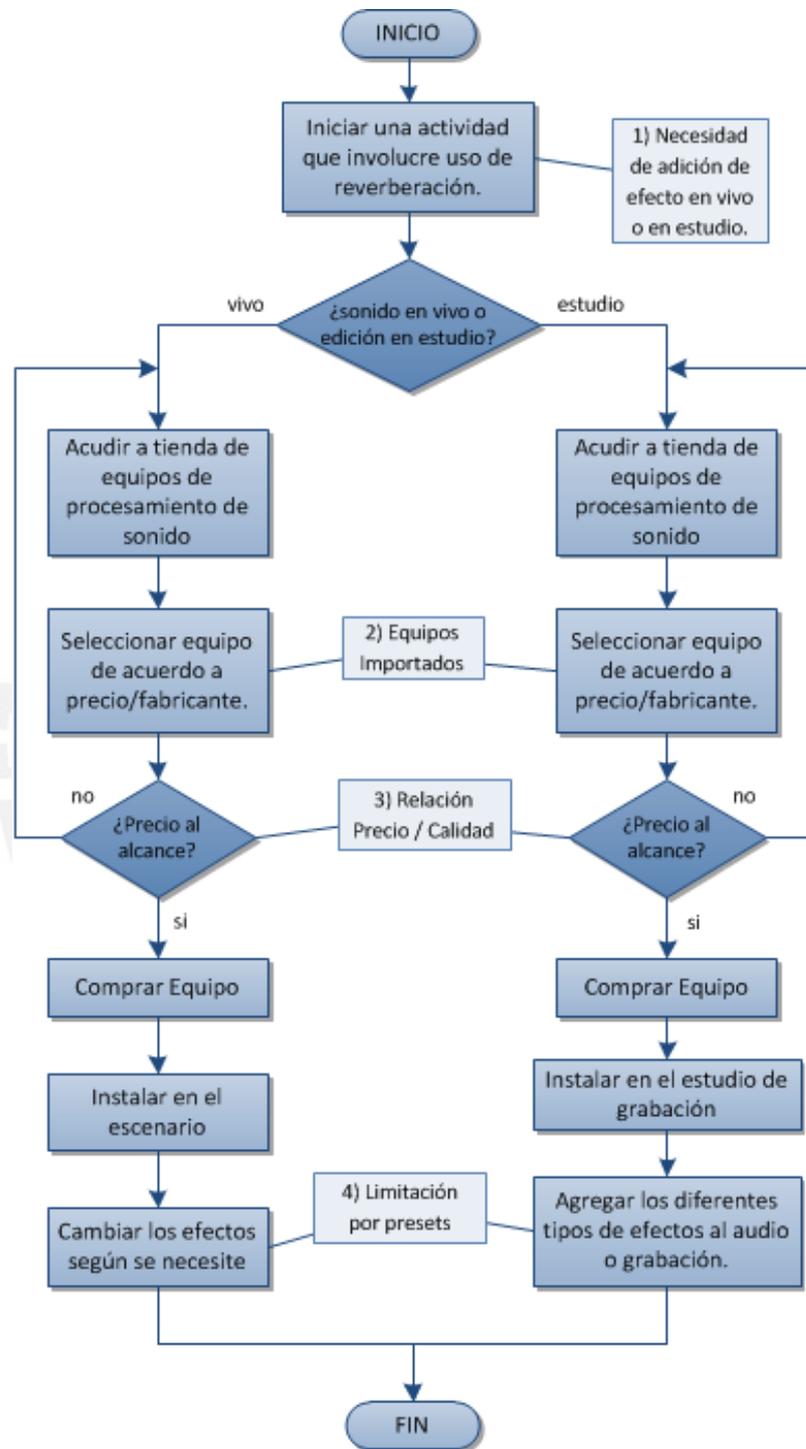


Figura 1.1 Diagrama de flujo del proceso de uso de un reverberador

Fuente: Elaboración propia

1.4.1. Descripción del proceso

Normalmente, cuando se busca un procesador de reverberación, significa que se ha iniciado una actividad que involucra la adición de efectos de sonido, específicamente la reverberación. Lo primero que cabe preguntarse es si se busca un reverberador capaz de brindar el efecto en tiempo real, es decir mientras se está reproduciendo el sonido original, o si basta con que la reverberación se aplique sobre un sonido previamente grabado, ya que en este caso, no existe el apremio por procesar la señal en tiempo real, y por lo tanto el procesador a usar no necesita ser tan veloz.

El siguiente paso en cualquiera de los dos casos, será acudir a una tienda en la que se vendan procesadores de audio, y de acuerdo al fabricante preferido o al precio, se elegirá alguno de los procesadores si es que se dispone de la capacidad económica para comprarlo. De lo contrario se continuará la búsqueda o se esperará a reunir el dinero necesario.

Una vez adquirido el equipo, se llevará a ser instalado en el escenario si se trata de una presentación en vivo, o en el estudio de grabación si es el caso. En el escenario se podrá ir variando los efectos según se necesiten, así como en el estudio de grabación, a cada fragmento de audio ya sea de voz o instrumental se le añadirá la reverberación elegida y luego se mezclará con el resto de la pieza.

1.4.2. Análisis del proceso.

En este proceso ya descrito se presentan situaciones particulares de las cuales se hará un análisis más profundo.

1) Necesidad de adición de efecto en vivo o en estudio.

Hay ocasiones, como conciertos o presentaciones musicales en vivo, en las que el aspecto más importante es que el efecto pueda generarse en tiempo real. Existen otras ocasiones en las que la respuesta en tiempo real no es tan importante, sino que esta respuesta suene lo más natural posible, sin importar el tiempo transcurrido en el procesamiento. Según sea el caso se puede optar por un procesador multiefectos que tenga la reverberación como uno de sus efectos, o por un procesador de reverberación de estudio, que se utiliza más en la post-producción musical o de películas.

2) Equipos importados

En el mercado limeño, los equipos procesadores de audio son importados debido a la carencia de desarrollo de esa tecnología en el país.

3) Relación precio/calidad

Es algo bastante difícil encontrar muy buena calidad a bajo precio, si acaso es posible. Los procesadores multiefectos que incluyen reverberación más conocidos en el mercado limeño son Alesis Microverb4 con un precio de \$190, el Behringer Virtualizer PRO DSP2024 con un precio de \$100 y el TC Electronic M350 con un precio de \$200 –precios más económicos encontrados-. Por otro lado tenemos al procesador de audio profesional para estudio TC electronic M3000, con mucha más naturalidad en los efectos de sonido, y un precio de \$1900.

4) Limitación debida a efectos pre-programados

En el caso de los procesadores más económicos, la flexibilidad para cambiar los parámetros de reverberación queda reducida por el hecho de contar con efectos pre-programados (también conocidos como presets). Mientras más flexibilidad se tenga, el precio va aumentando proporcionalmente.

1.5. Declaración de la Problemática

Es un hecho que en estos tiempos la cantidad de aficionados a la música y el sonido ha ido aumentando progresivamente, y así surge para ellos la necesidad de agregar efectos como la reverberación para que sus producciones, sean en vivo o en estudio, tengan mayor realismo y agraden más a quien las oiga. Sin embargo, en el contexto actual, la única posibilidad que tienen para este fin es adquirir procesadores importados, debido a la falta de desarrollo de esa tecnología en el país, y eso conlleva a que los estos potenciales usuarios se vean limitados principalmente por el factor económico, pues no todos tienen acceso.

Por otro lado, si se opta por comprar un procesador demasiado barato, se tendría limitada la calidad del sonido reproducido y la comodidad para maniobrar los pocos cambios que esos sistemas ofrecen. En caso se alcance a comprar procesadores entre los \$100 y \$300, los efectos son bastante aceptables, pero aún presentan la limitación de los presets, impidiendo una total libertad en la consecución de las respuestas impulsivas para el efecto del reverb.

CAPÍTULO 2

REVERBERADORES BASADOS EN TECNOLOGÍA DIGITAL

A lo largo de los años el hombre se ha esmerado en conseguir nuevos efectos musicales. Con la llegada de la electrónica se empezó a diseñar procesadores analógicos de audio con los que se obtuvo efectos diversos, tanto para enriquecer una pieza creada por medios tradicionales, como para sintetizar nuevos sonidos.

Con la llegada de la era digital y el desarrollo del procesamiento digital de señales, se crearon formas novedosas no sólo de procesar el sonido, sino de almacenarlo, comprimirlo, transportarlo y reproducirlo. Y el efecto de la reverberación es uno de esos efectos acústicos que no podían dejar de pasar por las manos de esta tecnología que avanza a paso agigantado.

En este capítulo se hablará sobre las novedades tecnológicas relacionadas al efecto de la reverberación de forma digital. Luego se definirán algunos conceptos que se consideran fundamentales para comprender el tema sin ambigüedades. Seguidamente se explicará el marco teórico sobre el que se desarrolla el tema del diseño del reverberador digital, y en él se dará a entender la relación existente entre sus distintos elementos integrantes y el procedimiento que se llevará a cabo para completar el diseño. Finalmente se mencionarán aquellos indicadores que por su relevancia guiarán de una u otra forma todas las etapas del diseño, sobre todo en lo que se refiere a las pruebas que se realicen.

2.1. ESTADO DEL ARTE

2.1.1. Presentación del Asunto de Estudio

La audición en recintos cerrados está siempre influenciada por la reverberación. Entendemos por reverberación a la persistencia del sonido debido a las múltiples reflexiones y al decaimiento de las ondas estacionarias del cuarto después que la fuente ha dejado de emitir sonido.

Es imposible pensar en una reproducción de música, canto u oratoria sin la cantidad correcta de reverberación en el ambiente en el que estamos escuchando. La reverberación completará la calidad acústica que el compositor imaginó (en el caso de la música). Por ejemplo, la música de cámara fue compuesta para sonar en grandes salones con mucha reverberación, la música gregoriana suena mejor en las grandes naves de las iglesias, en la oratoria la reverberación debe ser corta si se quiere inteligibilidad de la palabra.

A continuación se presentan las tecnologías vigentes con las que se consigue el efecto de la reverberación. Se empieza por lo que podrían ser los antecedentes de la producción de este efecto, que corresponde al uso de líneas de retardo, y llegamos a las distintas formas de aplicar el efecto de reverberación que es utilizando la convolución de una señal con la respuesta al impulso del espacio acústico que se desea reproducir.

Finalmente, se podrá apreciar que el campo del procesamiento del sonido es algo que está en pleno auge, que son muchas las compañías que ofrecen sus servicios a diferentes tipos de usuarios, sobre todo a músicos, y que el avance tecnológico en cuanto a capacidad de procesamiento se refiere, está permitiendo el desarrollo de algoritmos cada vez más potentes para conseguir con alta definición los diversos efectos de sonido existentes, siendo la reverberación uno de ellos en particular.

2.1.2. El Estado de la Investigación

1) Algoritmo de reverberación utilizando líneas de retardo

Una de las primeras formas en que se modeló la reverberación en los dispositivos de procesamiento digital de señales, fue a través de líneas de retardo, que representaban las reflexiones del sonido en las paredes y su decaimiento en el tiempo. El ingeniero Martínez Nuñez, en su Tesis “Procesamiento Digital y Control Gestural en Tiempo Real Utilizando una PC con Drivers ASIO para Efectos de Audio” nos explica de manera bastante concisa este procedimiento [1]:

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

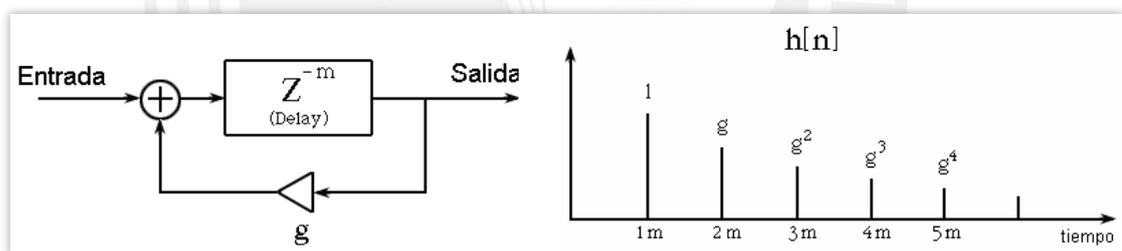


Figura 2.1 Diagrama y Respuesta en el tiempo del Filtro Peine
Fuente: [1]

La respuesta al impulso de un filtro peine se parece a un impulso que se refleja entre dos paredes, haciéndose cada vez más débil con cada reflexión. El tiempo de retraso utilizado puede ser comparado al tiempo que le toma al impulso para reflejarse desde una pared y llegar al oyente. La ganancia utilizada en un filtro puede ser escogida para alcanzar un tiempo de reverberación deseado. El otro filtro primordial es el filtro Pasa-
Todo, que tiene la propiedad de dejar pasar a todas las frecuencias sin alterar su amplitud, sólo la fase, reduciendo así una coloración del sonido.

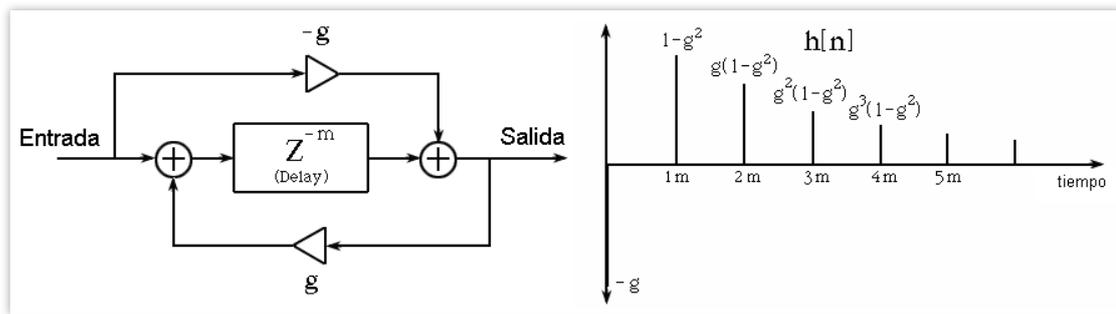


Figura 2.2 Diagrama y Respuesta en el tiempo del Filtro Pasa-Todo

Fuente: [1]

La estructura de este filtro es muy similar a la del filtro peine, excepto por que a la salida se le suma la señal de entrada con una ganancia negativa y sin retraso. El retraso puede ser cualquier número positivo de muestras y aún mostrará una respuesta plana en frecuencia. En las aplicaciones de reverberación, el retraso utilizado es de milisegundos, para mantener a los reflejos espaciados de una manera similar a la respuesta al impulso de un recinto.

Muchos de los primeros diseños de reverberación digital fueron realizados por Schroeder, y uno de sus diseños utiliza cuatro filtros peine y dos filtros Pasa-Todo, como se muestra en la Figura 2.3. Este diseño no crea un incremento de la tasa de llegada de los reflejos, y es un poco primitivo comparado con los algoritmos actuales.

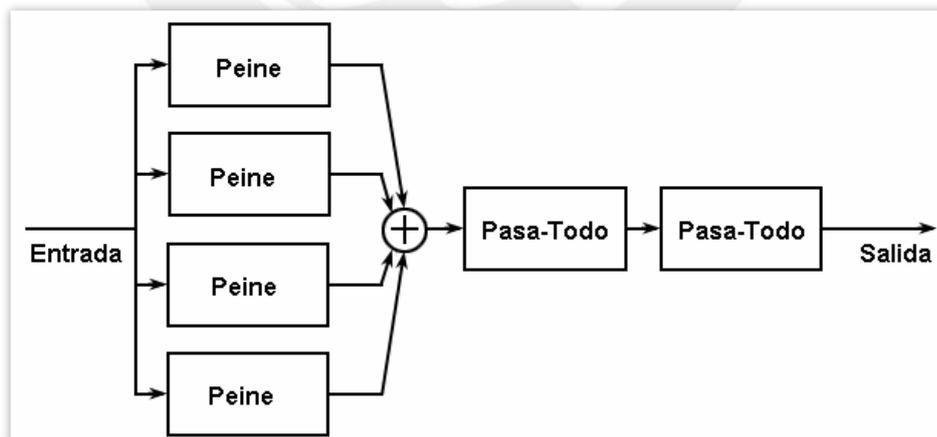


Figura 2.3 Diseño de Schroeder

Fuente: [1]

Se pueden desarrollar algoritmos más avanzados para modelar tamaños específicos de espacios, con una geometría dada de recinto, ubicación de fuente y oyente. Típicamente, un filtro de respuesta finita al impulso (FIR) es utilizado para crear los arribos tempranos, y luego se utilizan filtros IIR para las reverberaciones difusas. [1]

2) Algoritmo de reverberación utilizando la convolución con respuesta impulsiva del recinto

Una de las principales ventajas del método anteriormente descrito es que posee un bajo nivel de complejidad. La reverberación por convolución, por el contrario, requiere la utilización de más recursos de procesamiento, pero tiene como principal ventaja la obtención de un sonido mucho más real. La respuesta impulsiva que se multiplicará con la señal original puede ser obtenida de forma experimental, o puede ser generada mediante software teniendo en cuenta los parámetros que ésta posee.



Figura 2.4 Representación gráfica de la respuesta al impulso.
Fuente: [1]

2.1) Obtención experimental de la respuesta impulsiva

En el artículo “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE PROTOTIPO FUNCIONAL DE REVERBERADOR POR CONVOLUCIÓN EN TIEMPO REAL” presentado en el VI Congreso Iberoamericano de Acústica - FIA 2008 [2] se exponen las técnicas de medición de la respuesta impulsiva en un recinto real:

2.1.1) Respuesta al impulso

La respuesta al impulso se define como la respuesta de un sistema ante una señal de entrada impulsiva. Siempre cuando el sistema sea LTI (lineal e invariante en el tiempo) la respuesta al impulso puede obtenerse; esta señal contiene toda la información que existe acerca del comportamiento del sistema, permitiendo además el cálculo de la señal de salida del sistema ante cualquier señal de entrada. Según la normativa ISO 3382 una respuesta al impulso de un recinto se define como “una función de tiempo de la presión sonora recibida en un recinto y resultado de excitación del recinto por una función delta dirac”. [3]

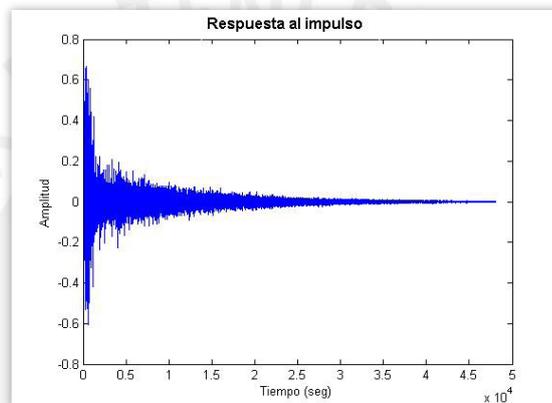


Figura 2.5 Respuesta al impulso.
Fuente: [2]

2.1.2) Mediciones de respuesta al impulso usando barridos senoidales

La respuesta al impulso usando este método se obtiene a través de un proceso matemático que se realiza entre la señal de prueba (barrido senoidal en este caso) que se emite en el recinto y esa misma señal de prueba grabada con un micrófono ubicado dentro de este. A partir de estas dos señales se realiza el proceso de deconvolución, a través del cual se calcula la respuesta al impulso del recinto. [2]

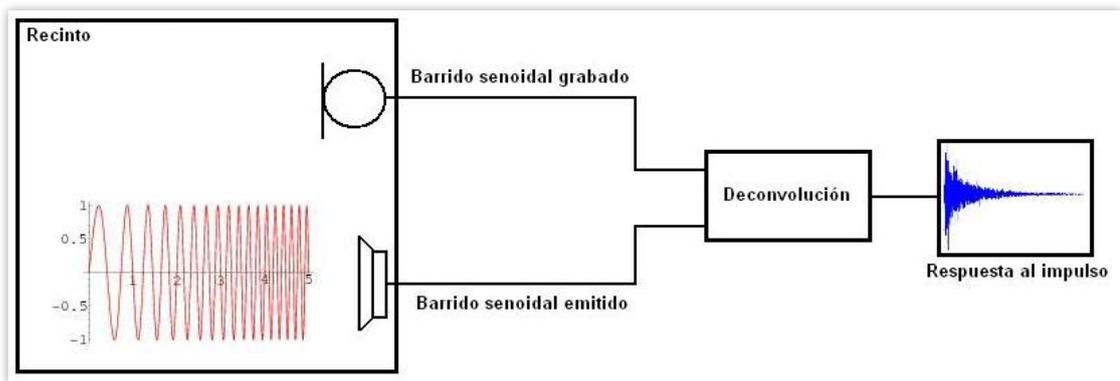


Figura 2.6 Medición de respuesta al impulso con barridos senoidales.
Fuente: [2]

2.1.3) Mediciones de respuesta al impulso Señales impulsivas

Esta técnica de medición es la más sencilla de todas y consiste en la captura de una señal impulsiva emitida (disparos, explosiones de mechas, etc.) dentro de un recinto y es grabada por medio de un micrófono. Este método facilita la obtención de la respuesta al impulso ya que esta señal se captura directamente sin tener que realizar posteriores cálculos o procesos matemáticos, ahorrando tiempo de medición. [2]

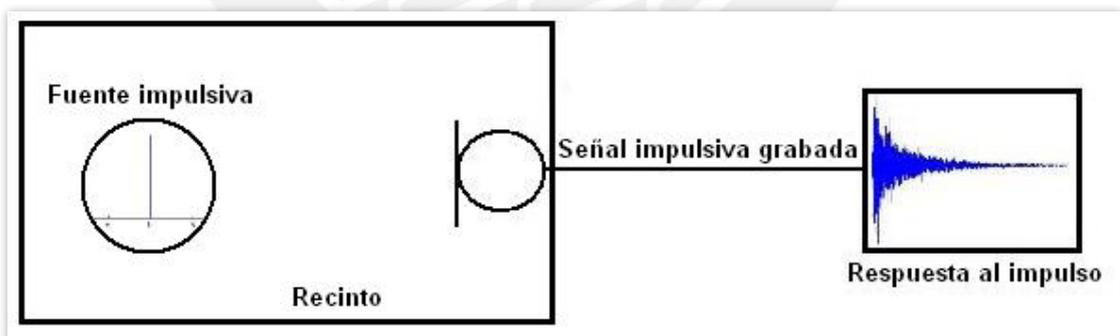


Figura 2.7 Medición de respuesta al impulso con señales impulsivas.
Fuente: [2]

2.2) Generación de la respuesta impulsiva por medio de software

Existe la posibilidad de generar una respuesta impulsiva mediante algoritmos que convierten los parámetros seleccionados en la respuesta impulsiva que dará origen al efecto deseado por el usuario. Sin embargo, debido a fines comerciales, estos algoritmos no se encuentran fácilmente pues las compañías los utilizan para elaborar sus productos, ya sean programas computacionales o consolas independientes que van conectadas al sistema de amplificación de sonido.

En los últimos años la tecnología de procesamiento de sonido ha avanzado a paso agigantado. Las principales marcas ofrecen equipos procesadores de sonido cada vez más complejo, y la tendencia es que un mismo equipo produzca toda la variedad de efectos de sonido y no uno solo. A continuación se presentarán algunos procesadores de refuerzo sonoro y procesadores de estudio.

2.2.1) Procesadores de refuerzo sonoro

i) ALESIS MICROVERB 4

Este equipo está diseñado para proporcionar una amplia variedad de efectos de gran sonoridad y fácil uso para pequeños estudios, ingenieros, y músicos. Entre sus características clave tenemos las siguientes [5]:

- 200 programas con efectos profesionales, como reverb, delay, chorus.
- 100 espacios de memoria para programas personalizados.
- Hasta 3 efectos simultáneos.
- Conversor AD de 18 bits.
- Entradas MIDI.



Figura 2.9 ALESIS MICROVERB 4.

Fuente: [5]

ii) **BEHRINGER VIRTUALIZER 3D FX2000**

Se trata de un procesador multiefectos que posee las siguientes características importantes [22]:

- Algoritmos de reverb y delay para conseguir un efecto natural.
- 11 efectos combinables. Selección de configuración paralelo/serie.
- Hasta 7 parámetros ajustables por efecto, incluyendo HI y LO EQ.
- Conversores A/D – D/A de 24 bits de resolución y sobremuestreo 64x/128x.
- Procesamiento Stereo en canales separados.
- Procesamiento de señal interno e 24 bits. Muestreo de 46 kHz.
- 100 programas de fábrica y 100 espacios de memoria para programas definidos por el usuario.
- Implementación MIDI.
- Medidores de nivel con leds – 8 segmentos.



Figura 2.8 BEHRINGER VIRTUALIZER 3D FX2000.

Fuente: [22]

iii) **YAMAHA SPX2000**

Este equipo, además de haber heredado la interfaz estándar de sus predecesores y sus programas comunes, trae una nueva dimensión a la calidad de sonido con el nuevo algoritmo de reverberación “REV-X” y el DSP de audio de 96kHz. Además ofrece una interfaz de usuario avanzada con características como 5 colores para la pantalla LCD, modo de bloqueo de operación, y un programa editor para la computadora. [23]



Figura 2.10 YAMAHA SPX2000.

Fuente: [23]

2.2.2) Reverberadores de estudio

Existen también equipos de última generación que son exclusivamente procesadores de Reverberación que se utilizan principalmente en estudios de grabación tanto para música como para películas, y no tanto en presentaciones en vivo.

i) TC ELECTRONIC M3000 STUDIO REVERB PROCESSOR

El M3000 es una unidad de que posee un conjunto de programas muy versátil, incluyendo 250 programas de un solo efecto y 50 programas multiefectos para producción musical, y de igual manera la post producción y edición de películas, consiguiendo un total de 600 programas, a los cuales se les puede modificar en cada caso, y de forma muy sencilla, el tiempo de decaimiento, el pre-delay, y en algunos casos, la coloración en altas frecuencias. [24]



Figura 2.11 Procesador M3000 de TC Electronic.

Fuente: [24]

2.2.3) La PC como procesador de Audio

Inicialmente los procesadores de audio surgieron debido a que el computador personal no tenía suficiente capacidad de procesamiento y se prefería tener un procesador que ejecutara las tareas específicas de procesar el audio. Sin embargo, las computadoras hoy en día tienen recursos de procesamiento más potentes que permiten que ésta sea utilizada como plataforma para el procesamiento de sonido de alta calidad.

i) **CSR - CLASSIK STUDIO REVERB**

CSR ofrece una solución para virtualmente cualquier músico basado en computadora. Se incluye VST, RTAS y formatos AUDIO UNIT para Mac y PC, permitiendo al CSR trabajar como plug-in con entornos virtuales tales como Cubase, Logic, Pro Tools, Digital Performer, Sonar, Ableton Live, y más. [25]

Funcionalidades:

- Cuatro unidades de reverberación separadas: Láminas, sala, hall e inverso
- Innovadores algoritmos de reverberación basados en DSP
- Dos modos de operación: fácil y avanzado
- Seis controles fáciles de usar en el modo Fácil
- Más de 100 parámetros en el modo Avanzado
- Matriz de modulación 8x8 altamente personalizable por unidad
- 4 macros asignables por unidad
- Automatización completa a través de la aplicación del host



Figura 2.12 Vista de la Unidad Plate (Lámina) del Paquete CSR de IK Multimedia.

Fuente: [25]

2.1.3. Síntesis sobre el Asunto de Estudio

El efecto de la reverberación y su forma de modelarse digitalmente han sido objetos de estudio en las últimas décadas y con el modelo de reverberación natural se llegó a una primera buena aproximación, utilizando líneas de retardo que representaban las reflexiones sobre las paredes, y coeficientes que atenuaban estas reflexiones, representando el coeficiente de absorción de las paredes hasta alcanzar que el sonido se disipe.

Sin embargo, con la posibilidad de utilizar el procesamiento de señales para operaciones más complejas y a mayor velocidad, se buscaron las formas de almacenar las características acústicas de un recinto para convolucionarla con un sonido cualquiera y lograr el efecto de que el sonido resultante se percibiera como si hubiese sido emitido en el recinto mencionado. Siguiendo con esta línea se han realizado diversos experimentos para obtener la respuesta impulsiva de ciertos lugares, y se han conseguido resultados muy buenos con respecto a la sensación de estar reproduciendo adecuadamente el espacio acústico que se tenía como objetivo.

Hoy en día con el desarrollo de tecnologías en Procesamiento digital de Señales, muchas compañías han desarrollado procesadores capaces de elaborar la respuesta impulsiva de la reverberación a través de algoritmos, que además permiten al usuario modificar ciertos parámetros a su gusto teniendo así la posibilidad de obtener una cantidad muy extensa de efectos tan sólo de reverberación, ya que por lo general estos procesadores son multiefectos.

Por lo visto, la tendencia es aprovechar que tenemos a disposición una tecnología que nos permite procesar mucha información en poco tiempo, y combinar eso con brindarle al usuario final una interfaz de fácil manejo y con un costo moderado. Por tal motivo, el presente estudio propone el diseño de un reverberador digital, utilizando los conocimientos en acústica y procesamiento digital de audio, para obtener la señal reverberada a partir de algoritmos digitales desarrollados bajo un enfoque sensorial, lo cual será presentado en una computadora y permitirá al usuario elegir el tiempo de reverberación deseado.

2.2. Señal

Una señal está definida como cualquier cantidad física que varía con el tiempo, espacio o cualquier otra variable independiente. Matemáticamente describimos una señal como una función de una o más variables independientes. [9]

2.2.1. Señal Analógica

La señal analógica es un tipo de señal definida para todos los valores en el tiempo y toma valores en el intervalo continuo (a,b) , donde a puede ser $-\infty$ y b puede ser ∞ . Matemáticamente, estas señales son descritas por funciones de variable continua. [9]

1) El sonido como señal

Se define sonido como vibración mecánica y/o ondas mecánicas en un medio elástico. Los sonidos pueden ser clasificados en términos de sus rangos de frecuencia. El sonido audible va de los 20Hz a los 20kHz. [10]. El sonido como señal se puede representar como la variación de la presión en función del tiempo.

2) El voltaje como señal

El voltaje es la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos A y B, y se define como el cociente del trabajo que se realiza para desplazar una carga eléctrica del punto A al punto B entre la magnitud de la carga. Sus unidades son joules por coloumb, llamados voltios (V). [11] A través de dispositivos como el micrófono, es posible convertir una señal de sonido a una señal eléctrica proporcional.

2.2.2. Señal Digital

Una señal discreta está definida únicamente para ciertos valores específicos en el tiempo, los cuales no son necesariamente equidistantes, pero en la práctica lo son usualmente. Una señal digital es una señal discreta que tiene un rango discreto de valores que puede tomar. [9]

1) Conversión A/D

Para que una señal sea procesada digitalmente, debe ser discreta en el tiempo y sus valores deben ser discretos. Si la señal a ser procesada está en forma analógica, es convertida a señal digital muestreando la señal analógica en instantes discretos en el tiempo, obteniendo una señal discreta en el tiempo, y luego cuantificando sus valores

a un rango de valores discretos, proceso que recibe el nombre de cuantificación. Para este procedimiento se utilizan los convertidores A/D (análogo-digitales) que se encargan de estos tres importantes pasos: muestreo de la señal, cuantificación, y codificación (convertir las cantidades discretas a código binario). [9]

2) Procesamiento digital de señales

El procesamiento de señales consiste en alterar la señal en forma no lineal. [12] El procesamiento digital de señales involucra la representación y procesamiento de señales utilizando dispositivos digitales. A pesar de que una señal sea inherentemente analógica, se puede derivar en un modelo digital y la mayor parte del análisis, diseño y procesamiento es llevada a cabo utilizando dispositivos digitales. Los avances en algoritmos numéricos y tecnología de sistemas digitales han hecho esta aproximación a un precio cada vez más accesible. [13]



2.3. Reverberación

Se le llama reverberación a la persistencia del sonido debido a sus múltiples reflexiones que van decayendo en amplitud a lo largo del tiempo llamado tiempo de reverberación. Este efecto proporciona al oyente una sensación de espacio. [1]

2.3.1. Producción acústica

En un recinto, partiendo de cualquier fuente de sonido, existe una ruta directa que cubre el sonido hasta alcanzar la escucha; sin embargo, el sonido puede tomar otras rutas más largas, reflejándose en las paredes o en el techo. Una onda de sonido reflejada llegará un poco más tarde que el sonido directo, debido a que viaja una mayor distancia, y es generalmente un poco más débil, debido a que las superficies del cuarto absorben un poco la energía del sonido. [1]

2.3.2. Producción digital

1) Líneas de retardo

Los primeros algoritmos digitales de reverberación intentaron imitar la reverberación de los recintos utilizando primordialmente dos tipos de filtros con respuestas al impulso infinitas (IIR), de manera que la salida decayera gradualmente. Uno de esos filtros es el Filtro Peine, cuya respuesta se parece a un impulso rebotando entre dos paredes, haciéndose cada vez más débil con cada reflexión. El otro filtro es el filtro Pasa-Todo, que tiene la propiedad de dejar pasar a todas las frecuencias sin afectarlas, reduciendo una coloración del sonido.[1]

2) Convolución

La reverberación por convolución, consiste en convolucionar la señal de audio con la respuesta al impulso del recinto cuyas características acústicas se desea agregar al sonido original en cuestión. Este proceso requiere mayor potencia de cálculo, pero los procesadores comerciales son capaces de conseguir estas exigencias. [2]

2.4. Matlab

MATLAB es un sistema interactivo cuyo elemento básico de información es un arreglo (vector o matriz) que no requiere ser dimensionado. Permite resolver muchos problemas técnicos de cómputo, especialmente aquellos con fórmulas de vectores y matrices, en corto tiempo. Entre sus usos típicos tenemos: desarrollo de algoritmos; adquisición de datos; modelamiento, simulación y diseño de prototipos; análisis de datos, exploración y visualización; gráficos científicos y de ingeniería; desarrollo de aplicaciones, incluyendo la construcción de la interfaz gráfica para el usuario. [14]

2.4.1. Matlab Guide

GUIDE, el Entorno de Desarrollo de Interfaz Gráfica de Usuario de MATLAB, provee un conjunto de herramientas para crear interfaces gráficas de usuario (GUIs). Estas herramientas simplifican enormemente el proceso de diseño y programación de las GUI. [16]

1) GUI (Interfaz Gráfica de Usuario)

Una interfaz gráfica de usuario (GUI) es una visualización gráfica en una o más ventanas conteniendo controles llamados *componentes*, que permiten al usuario realizar tareas interactivas. El usuario de la GUI no debe teclear comandos en la línea de comando para ejecutar las tareas. A diferencia de los programas en los que hay que modificar el código para ejecutar tareas, el usuario de la GUI no necesita entender los detalles de cómo se realizan dichas tareas.

Los componentes de la GUI pueden incluir menús, barras de herramientas, botones, listas desplegadas y barras deslizantes – por nombrar algunas. Las GUIs creadas usando las herramientas de MATLAB pueden además realizar cualquier tipo de cómputo, leer y escribir archivos, comunicarse con otras GUIs, y mostrar información como tablas y gráficos. [16]

2.5. Modelo Teórico

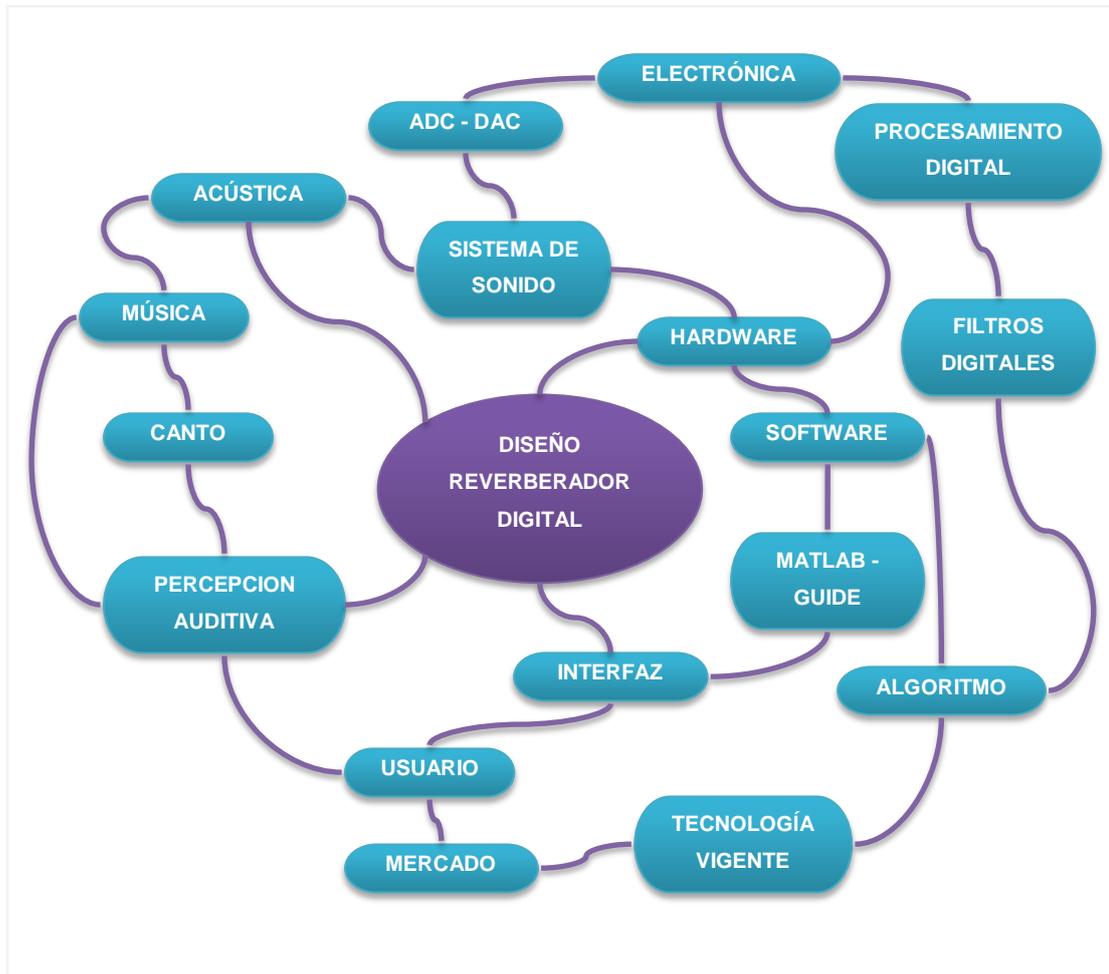


Figura 2.13 Mapa conceptual del Modelo Teórico.
Fuente: Elaboración Propia

2.5.1. Descripción

El **diseño de un reverberador digital** está ligado a una serie de conceptos cuya relación será explicada a continuación.

Para comenzar, la idea de diseñar un reverberador cuyos parámetros se puedan modificar fácilmente a través de una **interfaz** es mejorar la calidad de la **percepción auditiva** por parte del **usuario** de sonidos tales como cierto tipo de **música** y **canto**. Dado que estas son manifestaciones artísticas relacionadas con el fenómeno físico del sonido, y el estudio de la forma en que el sonido se propaga en un ambiente es la **acústica**, ésta también está estrechamente relacionada con el diseño del reverberador, ya que además la reverberación es un fenómeno acústico, y hay que conocer cuáles son los parámetros que lo caracterizan.

Para poder manipular el sonido, y con manipular me refiero a transformarlo lineal o no linealmente, la energía sonora debe convertirse en energía eléctrica (y viceversa luego de procesarse) y esto se consigue con los **sistemas de sonido**. Una vez conseguida la señal eléctrica, ésta debe discretizarse para poder manipularla matemáticamente a través de la **electrónica**. A través de los dispositivos **ADC** se consigue esta discretización, y la rama de la electrónica encargada de procesar la señal discreta es el **Procesamiento Digital de Señales**.

En el caso del diseño del reverberador digital, se deberá utilizar **filtros digitales** apropiados que operen bajo algún **algoritmo** que será diseñado en un **software** ejecutado en un **hardware** específico. En este caso, el hardware a utilizar será una computadora y sus recursos de memoria, adquisición y reproducción de sonido.

El software utilizado para el diseño será el **MATLAB** y una de sus principales herramientas, **GUIDE**, la cual servirá para crear una **interfaz** con la que el **usuario** podrá interactuar para conseguir los efectos deseados.

Para determinar la eficiencia del **algoritmo** implementado, tendrá que compararse con las **tecnologías vigentes**, que son además, aquellas que actualmente lideran el **mercado** de dispositivos de **procesamiento** de sonido, por ser aquellas que han alcanzado con mayor exactitud aquello que su **usuario** final buscaba.

2.5.2. Indicadores

- Tiempo de reverberación:** Se define como tiempo de reverberación (RT60) al tiempo requerido, en segundos, para que el sonido promedio en la habitación decaiga en 60 dB luego de que la fuente dejó de generar el sonido. [17]. Para cada tipo de evento acústico, es preciso un determinado tiempo de reverberación. A continuación se presenta una tabla con tiempos de reverberación adecuados, no adecuados, y óptimos para oratoria, música contemporánea y música coral.

	Tiempo de reverberación			
	.8 – 1.3	1.4 – 2.0	2.1 – 3.0	Óptimo
Oratoria	Bueno	Aceptable – Pobre	Inaceptable	0.8 – 1.1
Música contemporánea	Aceptable – Bueno	Aceptable	Pobre	1.2 – 1.4
Música coral	Pobre - Aceptable	Aceptable – Bueno	Bueno - Aceptable	1.8 – 2.0

Figura 2.14 Tabla del Tiempo de reverberación para cada tipo de fuente.
Fuente: [17]

En el diseño del reverberador digital este parámetro se podrá ajustar ingresando por el teclado el valor deseado.

- Frecuencia de muestreo:** Se refiere a la frecuencia con la que la señal analógica de audio será muestreada para convertirse en señal digital. La cantidad de muestras por segundo será determinada en el momento de la grabación del archivo *.wav, y el reverberador será flexible a trabajar con cualquier frecuencia de muestreo. Mientras mayor sea esta, mayor tiempo tomará el procesamiento.

- **Numero de bits por muestra:** De forma similar que en el caso de la frecuencia de muestreo, una cantidad mayor de bits por muestra significaría una mayor precisión en la cuantificación, pero utilizaría mayores recursos de procesamiento. El número de bits del audio original dependerá de la grabación. El procesamiento se realizará convirtiendo la señal de audio a un vector de punto flotante de doble precisión (double) el cual trabaja con 64 bits por muestra, y posteriormente la reproducción y grabación del sonido reverberado se efectuará con 16 bits por muestra.
- **Tiempo de procesamiento:** Es el tiempo que tomará al programa transformar la señal de audio original a audio reverberado. El tiempo es variable y depende principalmente de la frecuencia de muestreo de la señal original, y la duración del audio grabado. El producto de estas cantidades resulta ser el número total de muestras que posee el audio grabado, el cual será directamente proporcional a la duración del tiempo de procesamiento.
- **Pre-retardo (Pre-delay / pre-reverb delay [18]):** Se trata del tiempo que transcurre entre la emisión del sonido original y la primera reflexión. Mientras más largo sea este retardo, se obtiene la sensación de que la sala es más grande. En el caso del reverberador a diseñar en el presente estudio, este parámetro es editable en una variable del código del programa principal, pero no es ajustable desde la interfaz gráfica.
- **Densidad [18]:** Se refiere a la cantidad de reflexiones por unidad de tiempo. Una mayor densidad sugiere que el cuarto es más pequeño, pues los rebotes se dan rápidamente, y también agrega la sensación de que las paredes son más difusas. Teóricamente, la densidad se incrementa de forma exponencial a lo largo del tiempo. En el caso del reverberador digital a diseñar, la densidad se irá incrementando hasta llegar alrededor de las 10000 reflexiones por segundo. El fundamento de esta disposición será explicado posteriormente en la presente tesis.

- **Relación Sonido original / Sonido Reverberado:** Este es un parámetro usado en los reverberadores actuales y sirve para dar una idea de que tan lejos se encuentra el emisor del receptor, en el presente reverberador será posible establecer la proporción de tres líneas de sonido: el original, las reflexiones tempranas, y las reflexiones tardías.
- **Respuesta en Frecuencia:** Los reverberadores actuales permiten hacer un tratamiento diferenciado en los distintos rangos de frecuencias, así por ejemplo las altas frecuencias tienden a tener un tiempo de reverberación menor que las bajas frecuencias, lo cual se asemeja a la mayoría de recintos cuyas paredes absorben rápidamente las altas frecuencias y mantienen reflejando las bajas frecuencias por más tiempo. En el caso del reverberador a diseñar el tratamiento de la señal en frecuencia será uniforme.



CAPÍTULO 3

PLANTEAMIENTOS PARA EL DISEÑO DE UN REVERBERADOR DIGITAL

Como primer paso para dar inicio al diseño del reverberador, es preciso tener claros los lineamientos que guiarán el desarrollo de la investigación, de esa forma se puede recurrir a ellos en caso de verse tentado a desviarse de lo que se busca.

En la formulación de la fundamentación se pretende explicar las razones por las que este trabajo se considera importante, y parte servirá de motivación para desarrollarlo de la mejor forma posible.

En la declaración de la hipótesis se plantean aquellas ideas cuya veracidad se desea validar o en todo caso, realizar aportes para su validación en trabajos posteriores a la presente tesis.

En la enunciación del objetivo de la tesis se busca manifestar de forma concisa qué es lo que se pretende conseguir, y por consiguiente qué es lo que finalmente debería ser evaluado.

Finalmente en la metodología de la implementación se hace una lista de los pasos que deberán seguirse de forma ordenada para la consecución del objetivo principal y los objetivos secundarios.

3.1. FUNDAMENTACIÓN

3.1.1. Fundamentación teórico académica

El estudio de la reverberación como efecto de sonido que puede aplicarse a un archivo de audio previamente grabado a través del procesamiento digital de señales, contribuye por un lado a obtener nuevas alternativas además de las existentes, y por otro lado, abre las puertas para futuras investigaciones y desarrollos de nuevos efectos que tengan como base el procesamiento digital de sonido y el conocimiento de los principios acústicos que gobiernan dichos efectos.

3.1.2. Fundamentación relacionada a la Realidad

Actualmente existen procesadores de sonido muy potentes en el mercado peruano, pero la mayoría de ellos son costosos o poco accesibles. Muchos de los procesadores de reverberación utilizan líneas de retardo y también existen procesadores con efecto de reverberación que utilizan la convolución, pero limitan la cantidad de combinaciones a los presets que vienen de fábrica. La demanda de procesamiento de sonido en el mercado peruano está creciendo por el surgimiento de cada vez más personas que buscan dedicarse a la música y por la búsqueda de nuevas tecnologías para las producciones audiovisuales.

3.1.3. Fundamentación personal

El presente estudio se considera importante por dos principales razones. La primera es la satisfacción de desarrollar una herramienta útil y de fácil manejo relacionada al procesamiento de sonido, y así contribuir a que el país también sea un foco de investigación y desarrollo. La segunda es la importancia de desarrollar las habilidades y adquirir los conocimientos requeridos para conseguir desarrollar proyectos tecnológicos en un mediano a largo plazo, con los cuales sea posible hacer negocio y brindar a las personas una combinación de calidad y precio justo.

3.2. HIPÓTESIS

3.2.1. Hipótesis Principal

Es posible diseñar un reverberador digital que permita controlar el tiempo de reverberación de forma eficiente utilizando algoritmos digitales desarrollados bajo un enfoque sensorial, que pueda para brindar al oyente una sensación psicoacústica satisfactoria, y que sirva como base para brindar en el futuro una alternativa al mercado de procesadores de sonido.

3.2.2. Hipótesis Secundarias

- 1) El efecto de la reverberación aplicado a diferentes fuentes de sonido permite optimizar la calidad auditiva y brindar el efecto de estar en un determinado espacio acústico, y por esa razón es un efecto buscado por las personas relacionadas a la investigación, producción musical y audiovisual.
- 2) El desarrollo de las tecnologías de procesamiento digital permite que sea posible manipular la señal sonora grabada y convertirla mediante filtros digitales en una señal reverberada.
- 3) La búsqueda de una alternativa de procesamiento de sonido, contribuye a que más personas que no tienen acceso puedan beneficiarse.
- 4) El estudio del diseño de un reverberador digital abre las puertas a que se continúe una línea de investigación de procesamiento de sonido en el país.
- 5) Es posible modificar el tiempo de reverberación de forma precisa a través del control de las ganancias de los filtros IIR presentes en el reverberador propuesto por Schroeder.

3.3. OBJETIVOS

3.3.1. Objetivo General

Diseño de un reverberador basado en una combinación de algoritmos digitales, el cual permita añadir la cantidad justa de reverberación a un sonido previamente grabado utilizando como parámetros variables el tiempo de reverberación, la ganancia de la señal original, la ganancia de las reflexiones tempranas y la ganancia de la cola de reverberación, y cuya precisión será comprobada utilizando dispositivos de análisis acústico.

3.3.2. Objetivos Específicos

- 1) Comprender a fondo el fenómeno acústico de la reverberación y conocer los algoritmos de reverberación digital existentes.
- 2) Conocer las características en tiempo y en frecuencia de los filtros FIR e IIR, como los filtros Peine y Pasatodo, para ser implementados en código Matlab.
- 3) Combinar en código Matlab los filtros Peine y Pasatodo según el modelo de Schroeder y comprender la relación entre los valores de las ganancias y retardos de los filtros con el tiempo de reverberación y densidad temporal.
- 4) Modificar el algoritmo propuesto por Schroeder para obtener una reverberación estereofónica basada en la no correlación del canal izquierdo y derecho.
- 5) Programar el algoritmo de reflexiones tempranas de Griesinger, el cual utiliza además una versión básica del filtro que simula la cabeza humana.
- 6) Aprender a utilizar la herramienta GUIDE de Matlab a fin de utilizar una interfaz gráfica para la selección del archivo *.wav y del tiempo de reverberación, así como para la reproducción y grabación del sonido reverberado.

3.4. METODOLOGÍA DE LA IMPLEMENTACIÓN

El diseño de reverberador digital se conseguirá alcanzar a través de las siguientes etapas:

1. Estudio de las características en el tiempo y frecuencia de los algoritmos existentes de reverberadores digitales.
2. Estudio de las características del algoritmo de reverberación propuesto por Schroeder.
3. Programación en MATLAB de un Filtro Peine.
4. Programación en MATLAB de un Filtro Pasatodo.
5. Programación en MATLAB del reverberador propuesto por Schroeder utilizando cuatro filtros peine en paralelo y dos filtros pasatodo en serie.
6. Adición de efecto de difusión estereofónica al reverberador de Schroeder.
7. Programación en MATLAB del ajuste automático de las ganancias de los filtros en función del tiempo de reverberación deseado.
8. Programación en MATLAB de un Filtro Pasabajo de un polo
9. Programación en MATLAB del algoritmo de reflexiones tempranas de Griesinger.
10. Integración del módulo de reverberación tardía y reflexiones tempranas.
11. Comprobación de resultados del funcionamiento del algoritmo mediante gráficas en MATLAB y equipos de adquisición de datos en el Laboratorio de Acústica de la universidad.
12. Implementación del algoritmo en una GUI (Interfaz Gráfica de Usuario) utilizando la aplicación GUIDE de MATLAB.

CAPÍTULO 4

DISEÑO DEL REVERBERADOR DIGITAL BASADO EN ALGORITMOS DE ENFOQUE SENSORIAL

Este capítulo final, y quizá el más importante, contiene el fundamento teórico y los detalles que se consideraron en el proceso del diseño del reverberador digital, así como la descripción detallada de los pasos que se siguieron para conseguir el resultado final.

En primer lugar se realiza una descripción de la diferencia entre los enfoques físico y sensorial, y cómo es válido diseñar un reverberador digital con cada uno de estos enfoques. Asimismo, se explica con mayor detalle las características perceptibles en el fenómeno de la reverberación, introduciendo los conceptos de reflexiones tempranas y reverberación tardía.

En segundo lugar se expone el funcionamiento de dos algoritmos clásicos basados en el enfoque sensorial, presentados por los físicos Manfred Schroeder y Davis Griesinger, así como cada uno de los elementos que componen estos algoritmos para un mejor entendimiento.

Por último, se presenta la propuesta final que involucra la integración del algoritmo de reflexiones tempranas de Griesinger y una versión modificada del algoritmo de reverberación de Schroeder. Junto con ello se muestra la interfaz gráfica que representa el producto final en funcionamiento, y el resultado de las pruebas realizadas en el laboratorio de electroacústica donde se demuestra el funcionamiento del reverberador.

4.1. Diseño de un Reverberador digital: Enfoque físico vs enfoque sensorial

Se puede definir al algoritmo de reverberación, o reverberador, como un sistema lineal discreto que simula la respuesta en el tiempo de un sonido proveniente de una fuente (entrada), que se reproduce en un recinto con características determinadas (sistema lineal), y llega modificado (salida) hasta uno o más receptores, comúnmente los oídos humanos. Para desarrollar un algoritmo de reverberación, es posible abordar la tarea desde dos enfoques: el físico y el sensorial.

Enfoque físico:

El enfoque físico busca simular la propagación del sonido exactamente como ocurre en el recinto donde fue emitido, desde la fuente hasta el receptor. La forma obvia y conocida de lograr esto es grabar la respuesta al impulso en el recinto deseado y procesar la reverberación a través de la convolución del sonido seco y la respuesta al impulso obtenida.

Cuando el recinto que se desea simular no existe, se puede intentar predecir la respuesta al impulso con consideraciones únicamente físicas, como la geometría del lugar, los materiales de la superficie que determinan el grado de absorción del sonido y la posición donde se encuentra el emisor y el receptor.

Para dicho propósito, se puede utilizar una técnica conocida con el término de auralización, la cual consiste en modelar computacionalmente la respuesta al impulso esperada de acuerdo a los parámetros geométricos y físicos introducidos para un recinto dado, y luego procesar dicha respuesta al impulso con el sonido seco mediante la convolución.

La ventaja de esta técnica es que ofrece una relación directa entre la especificación física del recinto y la reverberación resultante. Sin embargo, esta técnica es algo costosa computacionalmente e incluso inflexible.

Enfoque sensorial:

El enfoque sensorial busca reproducir sólo las características sensorialmente percibidas de la reverberación. Asumiendo que el espacio de todas las sensaciones percibidas por la reverberación puede ser dividido en N dimensiones independientes, si cada uno de estos atributos sensoriales puede ser asociado con alguna característica física de la respuesta al impulso, entonces se puede intentar construir un filtro digital con N parámetros que reproducen exactamente esos N atributos. Para simular la reverberación de un recinto en particular, se puede medir la respuesta al impulso, estimar los N parámetros e insertarlos en el “reverberador universal” capaz de reproducir una reverberación casi indistinguible de la original.

Las principales ventajas de este método son: la posibilidad de hacer un algoritmo eficiente basado en filtros de respuesta infinita al impulso (IIR), brindar control en tiempo real de los parámetros sensorialmente relevantes, idealmente un solo algoritmo bastaría para simular todas las posibilidades de reverberación. La principal desventaja es que no necesariamente provee una forma sencilla de cambiar una propiedad física del recinto que emula. Asimismo, es muy difícil conseguir un reverberador que pueda brindar un conjunto completo de controles para las sensaciones percibidas, por lo tanto, la tendencia ha sido simplemente diseñar reverberadores que produzcan un efecto sensorialmente indistinguible del fenómeno acústico de la reverberación en un recinto real.

El reverberador diseñado en el presente trabajo fue construido en base al enfoque sensorial y más que reproducir las características físicas del recinto, busca controlar las características sensoriales y simular diferentes recintos de manera indirecta. Sin embargo, siempre se tendrá en consideración el comportamiento del sonido en la reflexión de las paredes como una referencia de la cual se debe apuntar a realizar el modelado.

4.2. Reflexiones tempranas y reverberación tardía

Cuando un sonido es reproducido en un recinto, las ondas sonoras se reproducen en todas las direcciones, como una esfera, de tal forma que el sonido directo es aquel que viaja en línea recta desde la fuente hacia el receptor, y posteriormente llegan al receptor aquellos rayos sonoros que impactaron sobre las paredes y son reflejados en dicha dirección. Es posible diferenciar estas reflexiones en dos grupos: las reflexiones tempranas y la reverberación tardía.

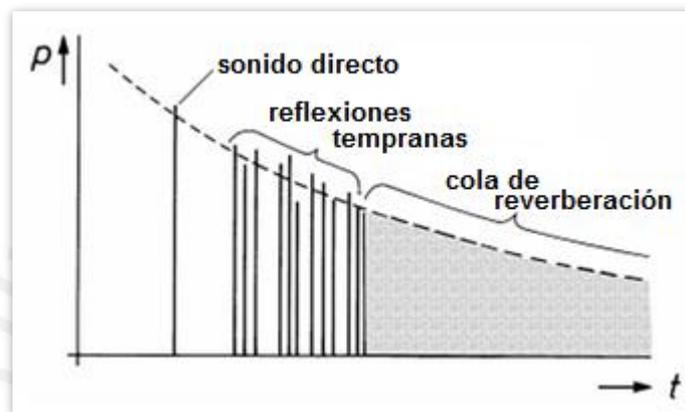


Figura 4.1 Ecograma: Gráfico de intensidad de la reflexión en función del tiempo.
Fuente: [10]

Las reflexiones tempranas corresponden a las ondas sonoras que llegan al receptor habiendo sido reflejadas por las paredes, una, dos y hasta tres veces. Estas primeras reflexiones dan una idea de la geometría del recinto y de la posición en la que se encuentra el receptor con respecto a la fuente. Además, se mezcla con el sonido directo modificando su intensidad y timbre.

A medida que las ondas sonoras continúan reflejándose por las paredes una y otra vez, aumenta su densidad y disminuye su intensidad, formándose una cola densa y difusa de reflexiones provenientes de todas las direcciones. Esta es la reverberación tardía y es la que irá decayendo hasta hacerse imperceptible. El tiempo que toma en decaer a -60dB se llama tiempo de reverberación.

El diseño del reverberador digital consistirá en el modelamiento de las reflexiones tempranas utilizando el modelo binaural propuesto por Griesinger en 1997, y el modelamiento de la reverberación tardía utilizando una versión modificada del modelo de reverberador de Schroeder de 1962.

4.3. Características del algoritmo de reflexiones tempranas binaural propuesto por Griesinger

4.3.1. Diagrama de Simulación para sistemas discretos en el tiempo

Prácticamente todos los sistemas lineales invariantes en el tiempo pueden ser descritos como un conjunto de ecuaciones diferenciales que constituyen un algoritmo computacional para su implementación. La estructura computacional de sistemas discretos en el tiempo se puede representar con un diagrama de bloques funcional, o diagrama de simulación, en el cual se muestra el algoritmo usando líneas de retardo (delays), sumadores (adders) y ganancias (multipliers).

La estructura de un sistema en diagrama de simulación sirve como base para el desarrollo del software que implementará dicho sistema en una computadora de uso general o un procesador digital, así como para el diseño y la implementación de la arquitectura de hardware para implementar el sistema usando componentes discretos.

El elemento de adición se usa para sumar dos o más secuencias, el elemento de multiplicación o ganancia se utiliza para escalar una secuencia por un valor constante, y el retardo unitario se usa para retardar una secuencia en una muestra [20].

Para ilustrar estos conceptos, tomemos como ejemplo la siguiente ecuación diferencial:

$$a \cdot x[n] + b \cdot x[n - 1] = y[n] \quad \text{Ecu. 4.1}$$

En un diagrama de simulación, su representación sería la siguiente:

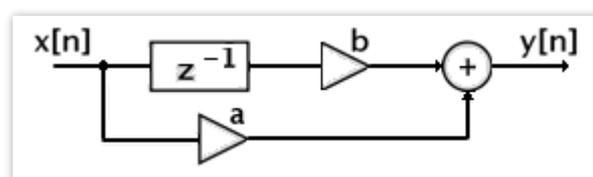


Figura 4.2 Ejemplo de Diagrama de Bloques.

Fuente: Elaboración Propia

En base a estos diagramas de simulación, se continuará explicando cada algoritmo necesario para la reverberación a lo largo del capítulo.

4.3.2. Filtro Pasabajo de un polo

El Filtro Pasabajo de un polo es un filtro IIR (Infinite Impulse Response), es decir, de respuesta infinita al impulso. Para mayor información acerca de filtros digitales se sugiere consultar [13], [20] y [21].

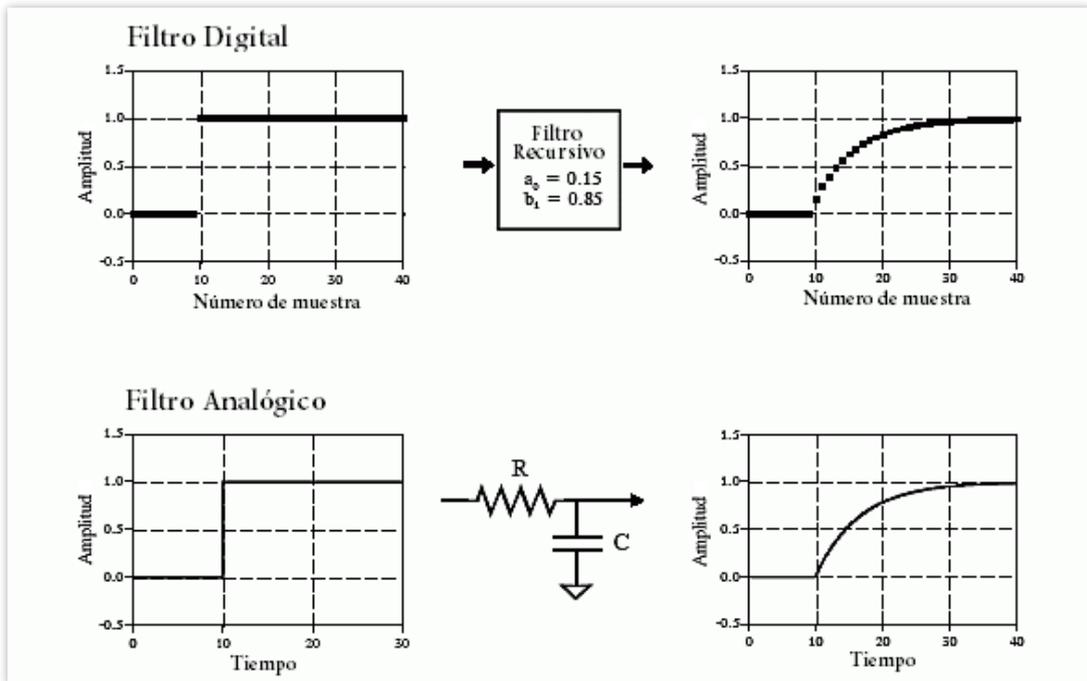


Figura 4.3 Funcionamiento de un Filtro pasabajo de un polo.
Fuente: [21]

Para la realización del reverberador digital será necesario el uso de un filtro Pasabajo de un polo con una frecuencia de corte de 2KHz independientemente de la frecuencia de muestreo de la señal a procesar. Para este fin se requiere determinar una fórmula para calcular automáticamente los parámetros de este filtro digital en función de la frecuencia de muestreo de la señal a procesar.

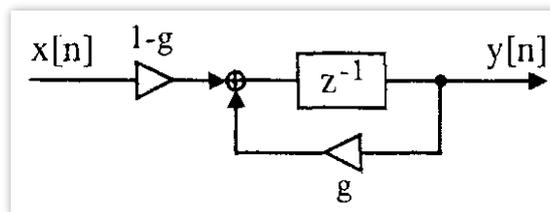


Figura 4.4 Filtro Pasabajo de un polo, normalizado.
Fuente: [19]

Stephen W. Smith propone en [21] una ecuación muy útil para determinar el valor de g (la ganancia según la Figura 4.4) en función de la frecuencia de corte buscada y la frecuencia de muestreo, donde d es la cantidad de muestras equivalentes a la constante de tiempo del filtro (el tiempo inverso a la frecuencia de corte, cuyo equivalente es RC en un filtro analógico):

$$g = e^{-1/d} \quad \text{Ecu. 4.2}$$

Sea F_s la frecuencia de muestreo de la señal a procesar, T_s el tiempo de muestreo ($1/F_s$), y F_c la frecuencia de corte, y τ la constante de tiempo, tenemos:

$$\frac{1}{d} = \frac{T_s}{\tau} = T_s \times 2\pi \times F_c \quad \text{Ecu. 4.3}$$

Combinando Ecu. 4.2 y Ecu 4.3 se obtiene la ecuación buscada:

$$g = e^{-T_s \times 2\pi \times F_c} \quad \text{Ecu. 4.4}$$

4.3.3. Función de transferencia relativa a la cabeza

Es un hecho acústico que el sonido percibido por uno de los oídos es ligeramente distinto al percibido por el oído contrario. Esto es debido a que se encuentran en diferentes puntos del espacio y además la cabeza y torso humanos distorsionan el sonido que los atraviesa.

Para poder simular digitalmente este efecto, hay muchas técnicas que calculan la función de transferencia relativa a la cabeza (en inglés Head-related Transfer Function - HRTF) y en [19] podemos encontrar un filtro que reproduce este efecto de forma muy aceptable para fines prácticos.

El filtro consiste en introducir un delay de 0.8 ms seguido de un filtro pasabajo de un polo con frecuencia de corte de 2KHz.

4.3.4. Características del modelo propuesto por Griesinger

En la Figura 4.5 se puede observar el algoritmo de reflexiones tempranas binaural que toma una entrada monofónica y produce una salida estéreo con la intención de ser escuchada con audífonos.

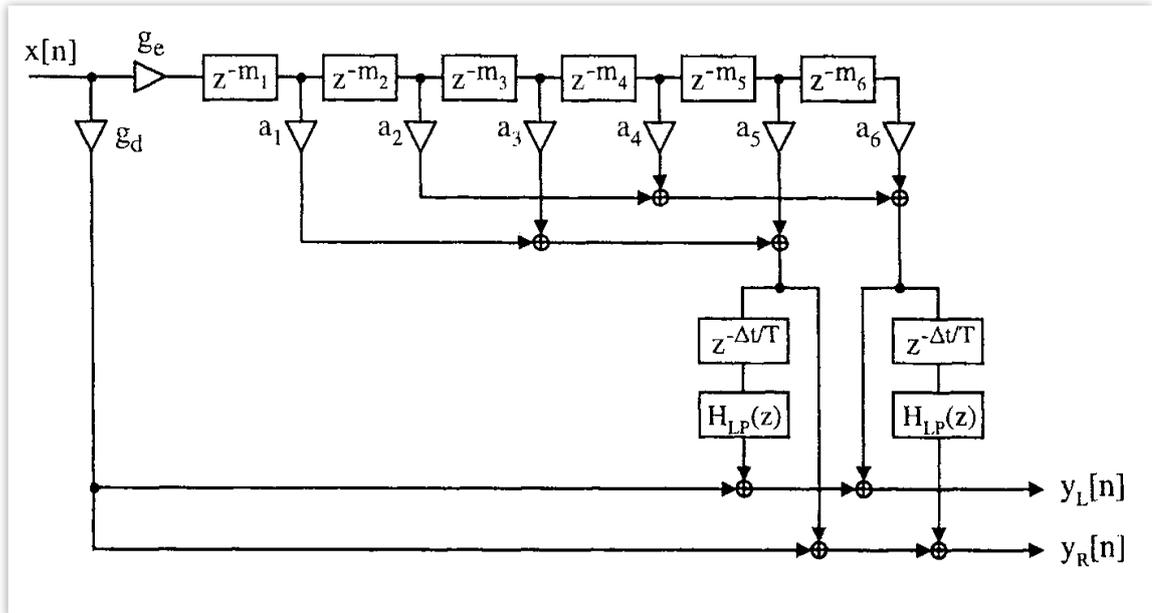


Figura 4.5 Algoritmo de reflexiones tempranas binaural [Griesinger, 1997].
Fuente: [19]

El algoritmo simula un sonido que incide frontalmente de forma directa, más seis reflexiones laterales, tres por cada lado. Los tiempos de retardo pueden ser escogidos arbitrariamente entre 10ms y 80ms o pueden derivarse de un modelo geométrico.

En este algoritmo se forman 2 conjuntos de reflexiones, luego cada una de ellas pasa por un filtro direccional que tiene la finalidad de simular la función de transferencia relativa a la cabeza, tal como fue descrito en 4.3.3.

Se pueden obtener varios grados de impresión espacial variando la ganancia de las reflexiones (el parámetro g_e) Ya sea que esta impresión se perciba como un indicador de amplio espacio o como un incremento en el grosor de la fuente, esto depende de la señal de entrada y de la amplitud y temporización de las reflexiones. Este simulador de reflexiones tempranas binaural funciona muy bien con voz hablada o cantada como señal de entrada.

4.4. Elementos y Características del algoritmo de reverberación propuesto por Schroeder.

4.4.1. Tiempo de reverberación de un Filtro Peine:

El Filtro Peine es un filtro IIR (Infinite Impulse Response), es decir, de respuesta infinita al impulso. Para mayor información acerca de filtros digitales se sugiere consultar [13].

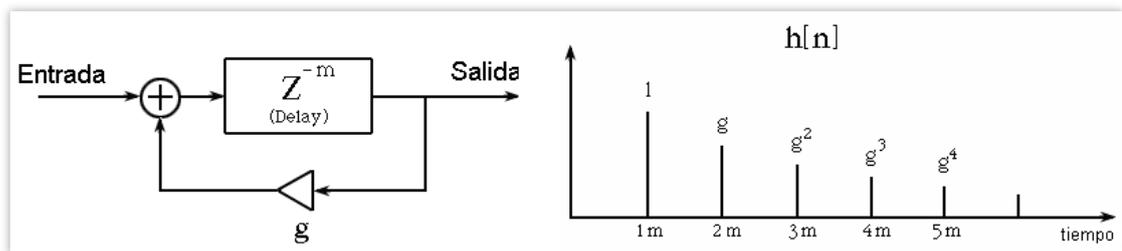


Figura 4.6 Diagrama de bloques y respuesta en el tiempo del filtro peine
Fuente: [1]

En la figura 4.6, z^{-m} representa un retardo de m segundos y g representa el factor por el que se va a multiplicar la señal de salida que será realimentada, se le conoce como ganancia que en este caso será una atenuación por estar en el rango de $<0;1>$. De esta forma, dada una entrada $x(t)=1$ en $t=0$ y $x(t)=0$ en $t>0$, se tendrá a la salida $y(0)=0$, $y(m)=1$, $y(2m)=g$, $y(3m)=g^2$, $y(4m)=g^3$, y así sucesivamente.

Se define como tiempo de reverberación (RT60) al tiempo requerido, en segundos, para que el sonido promedio en la habitación decaiga en 60 dB luego de que la fuente dejó de generar el sonido. [17]. En un filtro Peine, esto ocurrirá cuando la salida $y = g^n$ sea 60dB menos que 1, es decir cuando $20 \log(g^n) = -60$. Dado que $y(t)$ decaerá de forma exponencial, $20 \log(y)$ decaerá linealmente. De esta forma, la razón entre la atenuación $20 \log(g)$ y un periodo de retardo (m), debe ser proporcional a la razón entre 60 y el tiempo que la señal tarda en llegar a -60 dB, lo que es el Tiempo de reverberación.

Se definen así las ecuaciones 4.5 y 4.6 [19]:

$$\frac{20 \log_{10}(g_i)}{m_i T} = \frac{-60}{T_r} \quad \text{Ecu. 4.5}$$

$$g_i = 10^{-3m_i T/T_r} \quad \text{Ecu. 4.6}$$

Donde g_i es la ganancia de un filtro peine, m_i es el número de muestras del retardo, T es el periodo de muestreo, es decir, la inversa de la frecuencia de muestreo, y T_r es el tiempo de reverberación.

Dado un retardo fijo, si se desea manipular el tiempo de reverberación, bastará con variar la ganancia g_i de la ecuación 4.6. De esa manera, para un tiempo de reverberación deseado, se calcula su ganancia correspondiente y se implementa en el filtro peine.

A continuación se muestra un ejemplo con un $m_i = 1755$, $T = 2.2676e-005$ ($F_s = 44.1$ kHz), $m_i * T = 0.0398$, $g_i = 0.7$ y $T_r = 0.772$. En la figura 4.7 podemos apreciar el decaimiento exponencial y el decaimiento lineal en escala logarítmica, ambas en función del tiempo, obtenido realizando pruebas en Matlab.

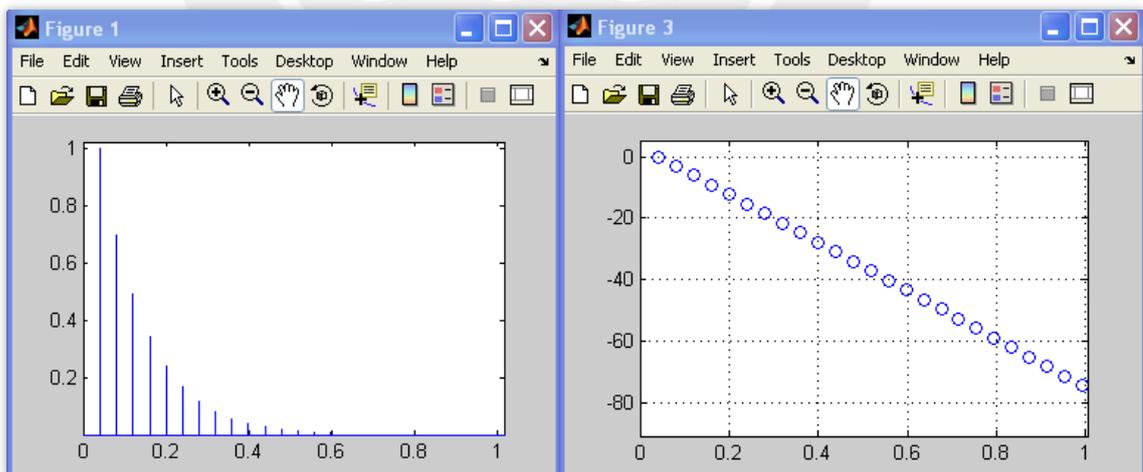


Figura 4.7 Respuesta en el tiempo de un Filtro Peine graficado en Matlab
Fuente: Elaboración Propia

4.4.2. Respuesta en frecuencia de un Filtro Peine

El filtro peine recibe ese nombre por la característica de su respuesta en frecuencia, que presenta picos en las frecuencias que son múltiplo de la inversa del tiempo de retardo. Así para el ejemplo anterior la respuesta en frecuencia será la que se muestra en la figura 4.8. Se observa que los picos se encuentran en las frecuencias múltiplos de 25 y esto se debe a que si $m_i * T = 0.0398$, entonces $1/(m_i * T) = 25.28$.

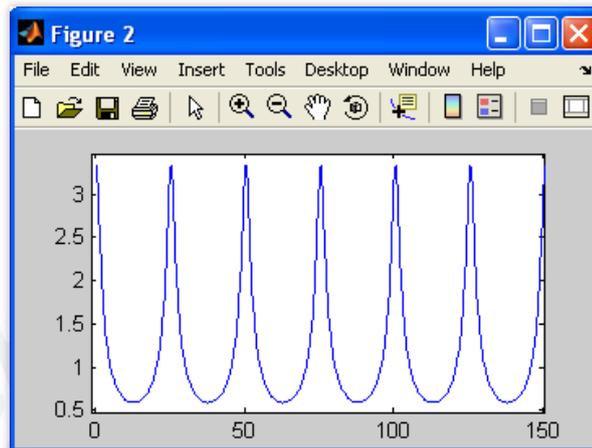


Figura 4.8 Respuesta en frecuencia de un Filtro Peine graficado en Matlab

Fuente: Elaboración Propia

Existe un problema si se trata de usar un único filtro peine como reverberador. Para tiempos de retardo cortos, con los cuales las reflexiones llegarían rápidamente una tras otra, la respuesta en frecuencia estaría caracterizada por picos ampliamente espaciados. Estos picos corresponden a las frecuencias que reverberarán, mientras que las frecuencias en medio de los picos decaerán rápidamente. Cuando los picos están muy separados, el filtro peine tiene un notable e incómodo timbre característico. Si se incrementa la densidad de los picos incrementando el tiempo de retardo, la densidad de reflexiones decrece en el dominio del tiempo, por lo tanto, la reverberación sonaría como un conjunto discreto de ecos, en lugar de un decaimiento sutil y difuso [19].

4.4.3. Características del Filtro Pasatodo

Se le llama así porque a diferencia del filtro peine, no atenúa ninguna frecuencia, sino que deja pasar a todas con igual magnitud. Por esta razón, este filtro es muy útil para ser conectado en serie con un filtro peine (o un arreglo de filtros peine) y aumentar la densidad de reflexiones en el tiempo sin alterar la magnitud de la señal.

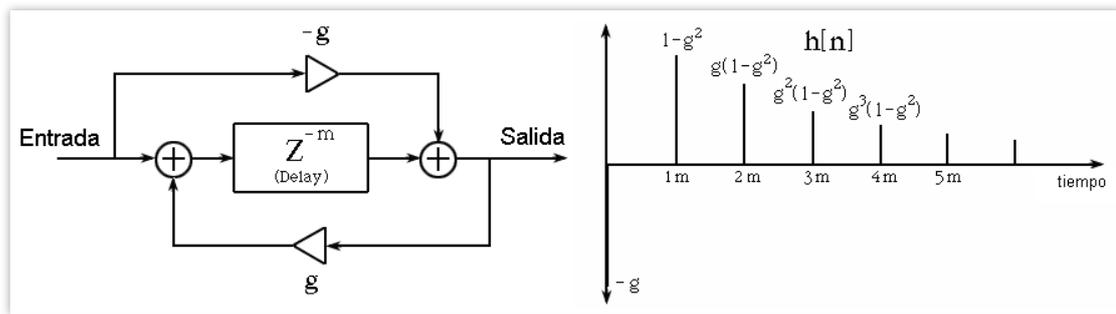


Figura 4.9 Diagrama de Bloques y Respuesta en el tiempo de un filtro Pasatodo
Fuente: [1]

Asumiendo la entrada $x[n]$ y la salida $y[n]$, a continuación se demuestra por qué la magnitud de este filtro es unitaria. Del diagrama se puede observar lo siguiente:

$$-g \cdot x[n] + x[n - m] + g \cdot y[n - m] = y[n] \quad \text{Ecu. 4.7}$$

Aplicando la transformada Z y despejando el cociente $H[z] = Y[z]/X[z]$ se obtiene la función de transferencia del filtro Pasatodo:

$$H[e^{j\omega}] = e^{-j\omega m} \frac{1 - g \cdot e^{j\omega m}}{1 - g \cdot e^{-j\omega m}} \quad \text{Ecu. 4.8}$$

Dado que la magnitud de $e^{-j\omega m}$ es unitaria, y el cociente es de dos números complejos conjugados, podemos concluir lo siguiente:

$$|H[e^{j\omega}]| = 1 \quad \text{Ecu. 4.9}$$

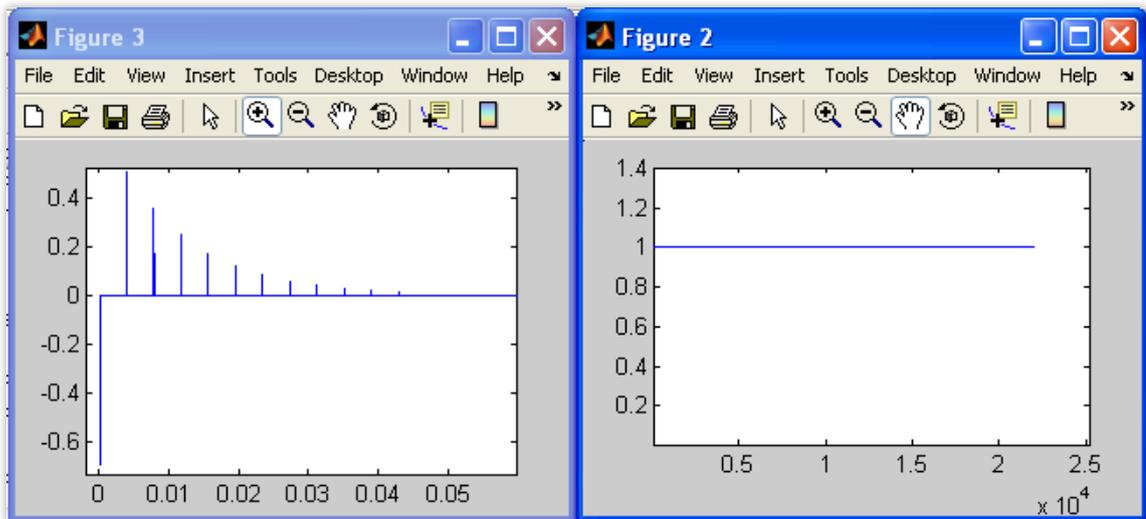


Figura 4.10 Respuesta en el tiempo y en frecuencia de un filtro pasatodo graficado en Matlab
Fuente: Elaboración Propia

4.4.4. Características del reverberador propuesto por Schroeder

En la Figura 4.11 podemos observar el algoritmo de reverberación que Schroeder en el año 1962 propuso con un arreglo de filtros peine y pasatodo.

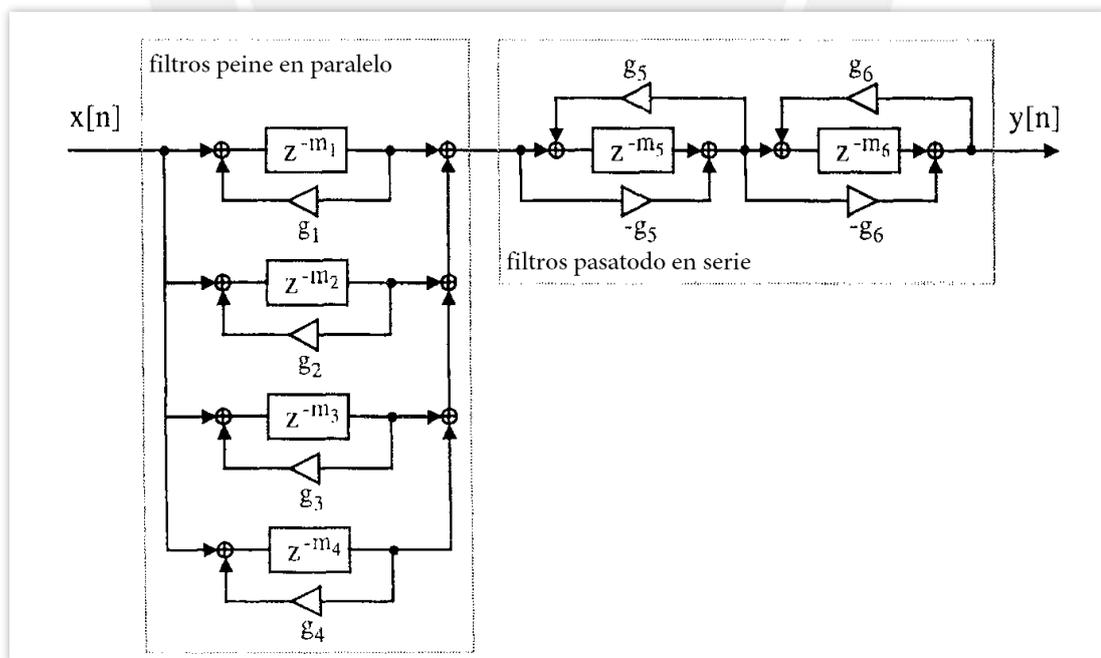


Figura 4.11 Reverberador de Schroeder
Fuente: [19]

La disposición de cuatro filtros peine en paralelo tiene dos ventajas principales: en primer lugar aumenta la densidad de las reflexiones sin aumentar la distancia de los picos de frecuencia, pues la densidad total del arreglo de filtros en paralelo será igual a la suma de las densidades de cada filtro peine; y en segundo lugar, aumenta los picos de frecuencia a fin de que la respuesta total tienda a ser más uniforme. Para conseguir esto, los retardos de cada filtro peine deben ser cantidades primas entre sí. Gracias a estas dos características se puede aumentar la densidad temporal de las reflexiones y la densidad de los picos en frecuencia evitando timbres desagradables, y así se daría, en parte, solución al problema de usar un solo filtro peine como reverberador.

Los dos filtros pasatodo conectados en serie contribuirán a aumentar la densidad temporal de las reflexiones sin modificar la respuesta en frecuencia (en magnitud) y sin modificar el tiempo de reverberación, pues multiplicarán la cantidad de reflexiones provenientes de los filtros peine.

Schroeder sugirió que los retardos de los filtros peine estén en el rango de los 30 a 45 ms y que los retardos de los filtros pasatodo sean mucho más pequeños, entre 1.7 y 5 ms, con ganancias alrededor de 0.7 [19]. Con esta disposición el reverberador alcanza una densidad temporal de reflexiones máxima que dependerá de los valores de los retardos, y se encuentra en el orden de las 10 000 reflexiones por segundo.

4.4.5. Adaptación Estéreo del Reverberador de Shroeder

Debido a que el reverberador de Schroeder tiene una salida monofónica, se decidió realizar un artificio para obtener una salida estereofónica. La importancia de este efecto se basa en la preocupación por otorgar un efecto más creíble subjetivamente por el usuario oyente. Ante la reverberación de un evento sonoro en un recinto, las reflexiones que llegan a nuestros oídos no son exactamente las mismas, pues a nuestro oído derecho llegan ciertas reflexiones en menor tiempo y mayor intensidad que en el oído izquierdo, y viceversa. Esta sensación de escuchar dos reverberaciones ligeramente diferentes pero con la misma duración, genera la sensación de que el sonido proviene de todos lados, lo cual es un efecto deseable en un reverberador.

El artificio utilizado es ciertamente empírico pero tiene como justificación lo mencionado en el párrafo anterior, y está basado en un modelamiento perceptivo más que físico. El esquema del reverberador de Schroeder modificado para generar el efecto estereofónico se muestra en la Figura 4.12. La salida $y_r[n]$ corresponde al canal derecho y $y_l[n]$ corresponde al canal izquierdo. Las ganancias g_5 tienen un valor 0.66 y g_6 tienen un valor de 0.7, debido a que Schroeder sugiere utilizar valores alrededor de 0.7 en su diseño original para obtener la mejor combinación de cantidad de muestras y amplitud de estas en la difusión que realiza el filtro. Los retardos en el canal derecho son 4,4 y 2,6 milisegundos y en el canal izquierdo son 3,9 y 3,1 milisegundos. En ambos casos la suma es 7 milisegundos.

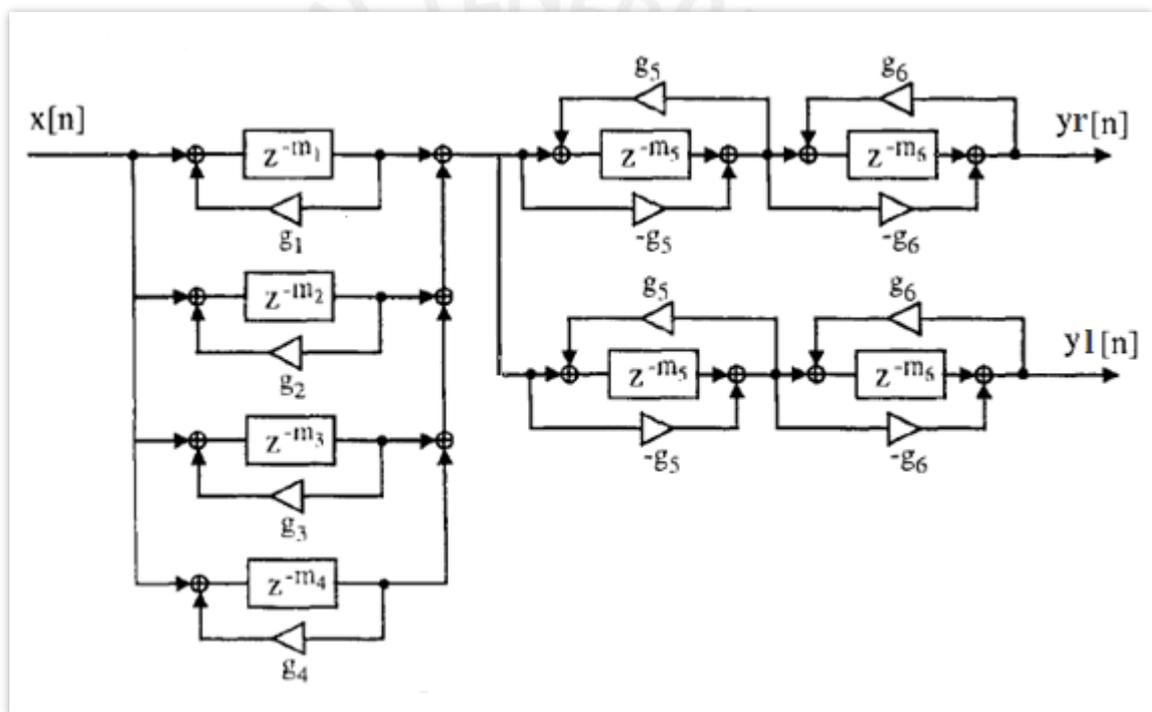


Figura 4.12 Modelo de Schroeder modificado para obtener una salida estereofónica
Fuente: Elaboración Propia

4.5. Diseño integral del Reverberador Digital

El reverberador propuesto es una combinación del sonido directo monoaural, el módulo de reflexiones tempranas usando el algoritmo de Griesinger y la versión personalizada del reverberador basado en el algoritmo de Schroeder. En la Figura 4.13 puede observarse el diagrama que describe este reverberador.

La salida final del reverberador integral es estéreo, y para cada canal (derecho e izquierdo), la señal resultante será la suma ponderada del sonido directo y el canal correspondiente de las reflexiones tempranas y la reverberación tardía, en la cual, cada señal será multiplicada por una ganancia controlable, con lo cual se aumentará la variedad de efectos posibles.

De esta manera, los cuatro parámetros que serán ajustables cada vez que se desee procesar una pista de audio con el efecto de reverberación son los siguientes: la ganancia del sonido directo, la ganancia de las reflexiones tempranas, la ganancia de la cola de reverberación, y el tiempo de reverberación. Uno de los criterios que se puede utilizar para definir el tiempo de reverberación, es la selección del uso que se le dará según la figura 2.14 ubicada en la sección 2.5.2 del presente documento. Asimismo, las ganancias del sonido directo y de las señales reverberadas definirán la relación sonido original / sonido reverberado.

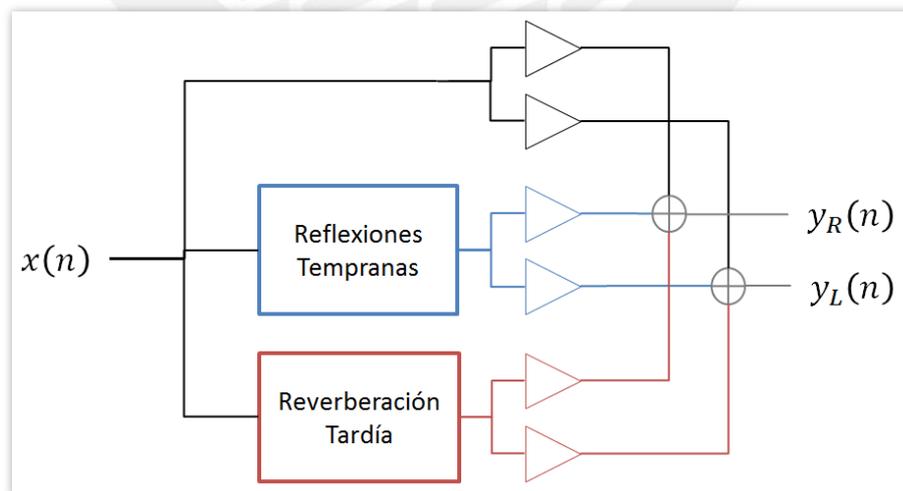


Figura 4.13 Diagrama de la Arquitectura del Reverberador Digital
Fuente: Elaboración Propia

4.6. Estructura y componentes de la Interfaz gráfica

La interfaz gráfica del Reverberador Digital ha sido realizada con la herramienta GUIDE de Matlab y además de ser el medio por el cual se cargará el archivo de sonido para ser procesado, tiene como objetivo brindarle al usuario una vista previa de cómo será la respuesta al impulso según el ajuste de los parámetros que realice.

Así pues, la gráfica está distribuida en tres sectores fácilmente reconocibles tal como se aprecia en la Figura 4.14: Selección de Parámetros, Tratamiento del archivo de sonido, y Gráficas de la Respuesta al impulso.

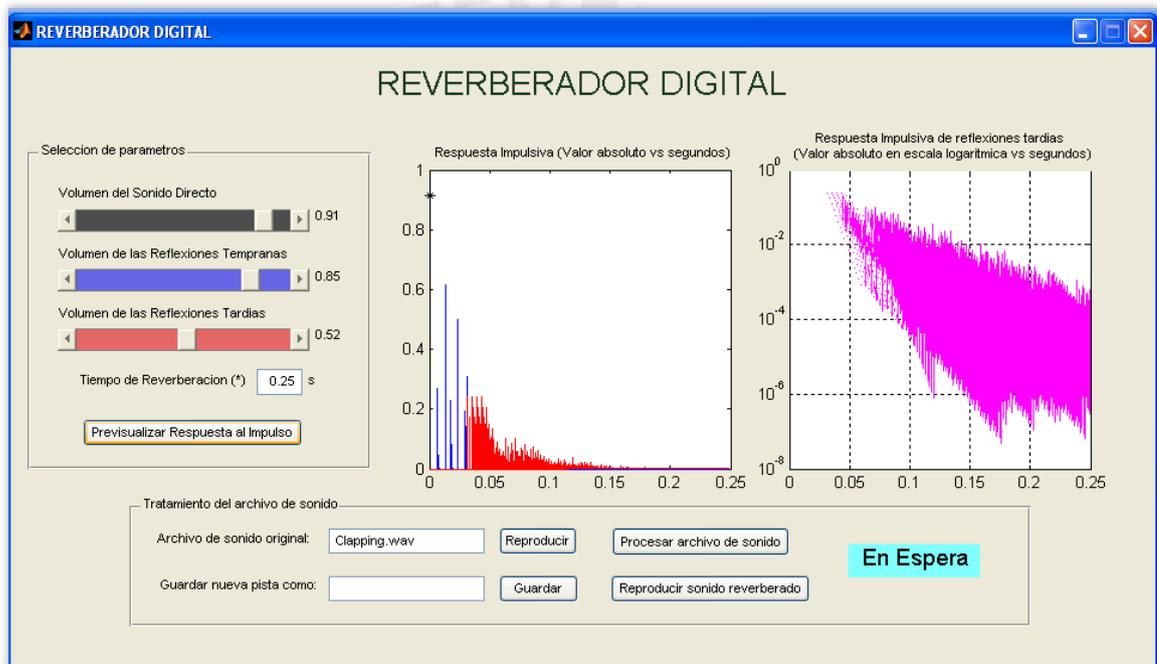


Figura 4.14 Interfaz gráfica del Reverberador Digital elaborada en MATLAB-GUIDE
Fuente: Elaboración Propia

En la sección de Selección de Parámetros se tienen cuatro controles y un botón de acción. El primer control es una barra deslizante con la que se seleccionará la ganancia asociada al sonido directo. El segundo control, también una barra deslizante, esta vez azul, sirve para ajustar la ganancia de la salida de la etapa de Reflexiones Tempranas. El tercer control, la barra roja, controla la ganancia de la salida de las reflexiones tardías o cola de reverberación. El cuarto parámetro a seleccionar es el tiempo de reverberación, y este es el tiempo en el que las reflexiones tardías decaerán en 60dB con respecto a la intensidad inicial que presenten. El botón “Previsualizar

Respuesta al Impulso” es bastante explícito, sirve para refrescar las gráficas según los parámetros elegidos.

La primera gráfica (a la izquierda) muestra la respuesta al impulso en escala lineal, donde el eje vertical representa el valor absoluto de la amplitud de la respuesta (asumiendo un impulso de amplitud 1 en $t=0$), en función del tiempo en segundos. El asterisco (*) marca la amplitud del sonido original multiplicado por la ganancia seleccionada, las líneas azules representan la respuesta al impulso de las reflexiones tempranas, y las líneas rojas representan la respuesta de las reflexiones tardías.

La segunda gráfica, muestra el valor absoluto de las reflexiones tempranas originadas por la misma señal impulsiva, y esta vez está en escala logarítmica, con la finalidad de ver con más facilidad el cumplimiento del tiempo de reverberación.

En la sección de “Tratamiento del archivo de sonido” tenemos los siguientes elementos:

- a. Caja de texto para ingresar el nombre del archivo de sonido a procesar (.wav).
- b. Botón “Reproducir”: Con este botón, Matlab reproduce el sonido para que el usuario se asegure de que es el archivo con el que desea trabajar.
- c. Botón “Procesar Archivo de Sonido”: marca el inicio del procesamiento del archivo de sonido con los filtros que componen al reverberador digital. El proceso puede tardar varios segundos.
- d. Caja de Texto para ingresar nombre del nuevo archivo de sonido generado.
- e. Botón Guardar: Graba en disco el archivo de sonido que por el momento está sólo en memoria, y utiliza el nombre ingresado en el cuadro de texto anterior.
- f. Reproducir Sonido reverberado: Reproduce el audio recién procesado.

La interfaz gráfica brinda de esta forma un medio sencillo e intuitivo para que un usuario pueda seleccionar el efecto de reverberación deseado y realice el procesamiento con la opción de guardar el nuevo archivo de sonido.

4.7. Funciones Matlab del Reverberador Digital

Como premisa del diseño del Reverberador Digital, la programación del mismo es modular, es decir que el programa principal requiere de otros módulos, subrutinas o funciones para llevar a cabo sus tareas.

Esta sección del capítulo tiene como propósito, describir las funciones matlab desarrolladas para la operatividad del Reverberador Digital. Sirve como una guía para lograr entender a cómo los diferentes componentes del programa interactúan entre sí para lograr el proceso de reverberación en una señal de audio digital.

Las funciones descritas pueden ser utilizadas en la integración de otros algoritmos de reverberación o procesamiento digital de audio, o pueden ser perfeccionadas para continuar operando en el mismo programa principal de manera transparente.

Para la modificación de las funciones se requiere tener el conocimiento suficiente en el lenguaje de programación matlab que permita interpretar directamente el código fuente, y esta guía sirve para poner en contexto al programador lector de tal forma que tenga un mejor criterio en el análisis del código.

4.7.1. FUNCIÓN FILTRO PASABAJOS DE UN POLO

NOMBRE DE LA FUNCIÓN MATLAB		
lowpass.m		
DECLARACIÓN DE LA FUNCIÓN		
y = lowpass (x, s, g)		
DEPENDENCIAS		
< ninguna >		
DESCRIPCIÓN		
<p>La función lowpass.m es un filtro digital de respuesta infinita al impulso (IIR) que funciona como un filtro pasabajos analógico RC de un polo. Dependiendo del valor de los parámetros de entrada, se puede conseguir diferentes frecuencias de corte.</p>		
PARÁMETROS DE ENTRADA		
x	Señal de entrada	Vector que contiene la secuencia de muestras de la pista de audio monoaural.
s	Tamaño del vector (size)	Cantidad de muestras del vector x .
g	Ganancia (gain)	Coefficiente en el rango de [0;1] que representa la ganancia de la señal realimentada del filtro. La relación entre este parámetro, la frecuencia de muestreo de la señal, y la frecuencia de corte deseada, se encuentra explicada en la sección 4.3.2 de la memoria descriptiva.
PARÁMETROS DE SALIDA		
y	Señal de salida	Vector resultante del procesamiento de x . Contiene la señal filtrada a la frecuencia de corte definida por g . La cantidad de muestras que posee es s .

4.7.2. FUNCIÓN FILTRO PEINE

NOMBRE DE LA FUNCIÓN MATLAB		
combfilter.m		
DECLARACIÓN DE LA FUNCIÓN		
y = combfilter (x, s, d, g)		
DEPENDENCIAS		
< ninguna >		
DESCRIPCIÓN		
<p>La función combfilter.m es un filtro digital de respuesta infinita al impulso (IIR) encargado por introducir las reflexiones atenuadas con un delta de tiempo, lo cual genera que se favorezca la resonancia de la frecuencia inversa al delta de tiempo y de sus armónicos, resultando que la respuesta en frecuencia del filtro tenga forma de peine.</p>		
PARÁMETROS DE ENTRADA		
x	Señal de entrada	Vector que contiene la secuencia de muestras de la pista de audio monoaural.
s	Tamaño del vector (size)	Cantidad de muestras del vector x .
d	Tiempo de retardo (delay)	Cantidad de muestras que equivalen al tiempo de retardo deseado. Resulta del producto de dicho tiempo multiplicado por la frecuencia de muestreo de la señal.
g	Ganancia (gain)	Coefficiente en el rango de [0;1] que representa la ganancia de la señal realimentada del filtro.
PARÁMETROS DE SALIDA		
y	Señal de salida	Vector resultante del procesamiento de x , el cual contiene las reflexiones añadidas por el filtro.

4.7.3. FUNCIÓN FILTRO PASATODO

NOMBRE DE LA FUNCIÓN MATLAB		
allpass.m		
DECLARACIÓN DE LA FUNCIÓN		
y = allpass (x, s, d, g)		
DEPENDENCIAS		
< ninguna >		
DESCRIPCIÓN		
<p>La función allpass.m es un filtro digital de respuesta infinita al impulso (IIR) cuya función es aumentar la densidad de la señal sin alterarla magnitud de la respuesta en frecuencia de la señal, sólo su fase. Debido a que no atenúa ninguna frecuencia como los filtros pasa alto, pasa bajo o pasa banda, se le conoce como filtro pasa todo.</p>		
PARÁMETROS DE ENTRADA		
x	Señal de entrada	Vector que contiene la secuencia de muestras de la pista de audio monoaural.
s	Tamaño del vector (size)	Cantidad de muestras del vector x .
d	Tiempo de retardo (delay)	Cantidad de muestras que equivalen al intervalo de tiempo entre las nuevas reflexiones generadas.
g	Ganancia (gain)	Coefficiente en el rango de [0;1] que representa la ganancia una de las señales realimentadas del filtro y el complemento de la otra señal
PARÁMETROS DE SALIDA		
y	Señal de salida	Vector resultante del procesamiento de x , que contiene las reflexiones añadidas por el filtro.

4.7.4. FUNCIÓN REFLEXIONES TEMPRANAS

NOMBRE DE LA FUNCIÓN MATLAB		
earlyreflect.m		
DECLARACIÓN DE LA FUNCIÓN		
y = earlyreflect (x, fs, s, ed, eg)		
DEPENDENCIAS		
lowpass.m		
DESCRIPCIÓN		
<p>La función earlyreflect.m ejecuta el algoritmo de Reflexiones Tempranas explicado en el capítulo 4.3.4 de la memoria descriptiva y graficado en la figura 4.5, transformando una pista monoaural en una binaural que simula las primeras reflexiones del sonido emitido.</p>		
PARÁMETROS DE ENTRADA		
x	Señal de entrada	Vector que contiene la secuencia de muestras de la pista de audio monoaural.
fs	Frecuencia de Muestreo	Cantidad que representa el número de muestras por segundo de la pista grabada.
s	Tamaño del vector (size)	Cantidad de muestras del vector x .
ed	Arreglo de Retardos (Early reflections delay array)	Arreglo de seis valores que representan cada retardo de la figura 4.5 [$m_1; m_6$] en segundos.
eg	Arreglo de Ganancias (Early reflections gain array)	Arreglo de seis coeficientes [0;1] que indican cada ganancia de la figura 4.5 [$a_1; a_6$].
PARÁMETROS DE SALIDA		
y	Señal de salida	Matriz resultante del procesamiento de x , formada por los vectores de cada canal estéreo.

4.7.5. FUNCIÓN REFLEXIONES TARDÍAS

NOMBRE DE LA FUNCIÓN MATLAB		
latereverb.m		
DECLARACIÓN DE LA FUNCIÓN		
y = latereverb (x, fs, s, rt)		
DEPENDENCIAS		
combfilter.m, allpass.m		
DESCRIPCIÓN		
<p>La función latereverb.m ejecuta la versión modificada del algoritmo del Reverberador propuesto por Shroeder explicado en el capítulo 4.4.5 de la memoria descriptiva y graficado en la figura 4.12, transformando una pista monoaural en una binaural que simula las reflexiones tardías del sonido emitido.</p>		
PARÁMETROS DE ENTRADA		
x	Señal de entrada	Vector que contiene la secuencia de muestras de la pista de audio monoaural.
fs	Frecuencia de Muestreo	Cantidad que representa el número de muestras por segundo de la pista grabada.
s	Tamaño del vector (size)	Cantidad de muestras del vector x .
rt	Tiempo de reverberación	Cantidad de segundos que se desea que la reverberación demore en decaer a -60dB. Con esta variable se calculan automáticamente las ganancias de los filtros peine.
PARÁMETROS DE SALIDA		
y	Señal de salida	Matriz resultante del procesamiento de x , formada por los vectores de cada canal estéreo.

4.7.6. PROGRAMA PRINCIPAL DEL REVERBERADOR DIGITAL

NOMBRE DEL PROGRAMA MATLAB
DigitalReverb2.m - DigitalReverb2.fig
INVOCACIÓN DEL PROGRAMA
>> DigitalReverb2
DEPENDENCIAS
earlyreflect.m, latereverb.m
DESCRIPCIÓN
El programa DigitalReverb2 es una interfaz gráfica (GUI) compuesta por la ventana de interacción (DigitalReverb2.fig) y el código de funciones Callback (DigitalReverb2.m). La integración de las funciones está descrita en el capítulo 4.5 de la memoria descriptiva, y la interacción con el usuario está explicada en el capítulo 4.6.
ENTRADAS
<ul style="list-style-type: none">- Volumen del sonido directo- Volumen de las reflexiones tempranas- Volumen de las reflexiones tardías- Tiempo de reverberación- Archivo de Sonido Original- Nombre del archivo resultante
CONTROLES
<ul style="list-style-type: none">- Botón de previsualización de Respuesta al Impulso- Botón Reproducir- Botón Procesar archivo de sonido- Botón Guardar- Botón Reproducir sonido reverberado
SALIDAS
<ul style="list-style-type: none">- Gráfica Respuesta Impulsiva- Gráfica Respuesta Impulsiva de reflexiones tardías en escala logarítmica- Pista de sonido procesado

4.8. Pruebas en el Laboratorio de Electroacústica

Para verificar el funcionamiento del reverberador digital con instrumentos de medición profesionales en el campo de la electroacústica, se utilizó el analizador de señales del laboratorio de Electroacústica de la PUCP: Signal Analyzer Unit Type 2035 – Brüel & Kjaer y una laptop ADVANCE con Matlab ejecutando la reproducción del sonido reverberado. El resultado de las pruebas fue el esperado y a continuación se presentan la preparación y el resultado de las mismas.

4.8.1. Preparación para las pruebas en el Laboratorio

Para la realización de las pruebas fueron necesarios los siguientes ítems:

- Notebook ADVANCE – Intel Core i5 M460 @ 2.53GHz – 4.00 GB RAM
- MATLAB 7.0
- Código Matlab de la Interfaz gráfica del Reverberador digital y todos sus módulos internos.
- Archivo de sonido con ruido rosado ruidorosa_1s.wav
- Cable de audio Jack Stereo 3,5mm a BNC.
- Signal Analyzer Unit Type 2035 – Brüel & Kjaer
- Disco Flexible de 3 ½ (Floppy disk)
- Lector de Disco Flexible con salida USB.

4.8.2. Descripción y alcance de las pruebas

Las pruebas consistieron en medir el tiempo de decaimiento a -60dB (Tiempo de reverberación) de una señal de ruido rosado en tres puntos específicos del espectro de frecuencia: 200Hz, 500Hz y 4000Hz. Esta prueba se realizó con dos tiempos de reverberación programados en el reverberador digital: 2s y 4s.

Para realizarlo, primero se reprodujo el ruido rosado con una reverberación de 2 segundos en la laptop, la cual estaba conectada al analizador a través del Cable stereo-BNC. En el analizador se inició la captura de datos y luego de previsualizar la señal en la pantalla tal como se muestra en la figura 4.15, se exportaron los datos correspondientes a las frecuencias 200Hz, 500Hz y 4000Hz a archivos .CVP para ser grabados en un disco flexible. Posteriormente se realizó el mismo procedimiento para la señal de ruido rosado con 4 segundos de tiempo de reverberación.

Una vez que se contaba con la información necesaria en el disquete, esta se grabó en la laptop utilizando el lector de disquetes para un post procesamiento y elaboración de gráficos para ilustrar el resultado final de la prueba, utilizando Microsoft Excel 2010.

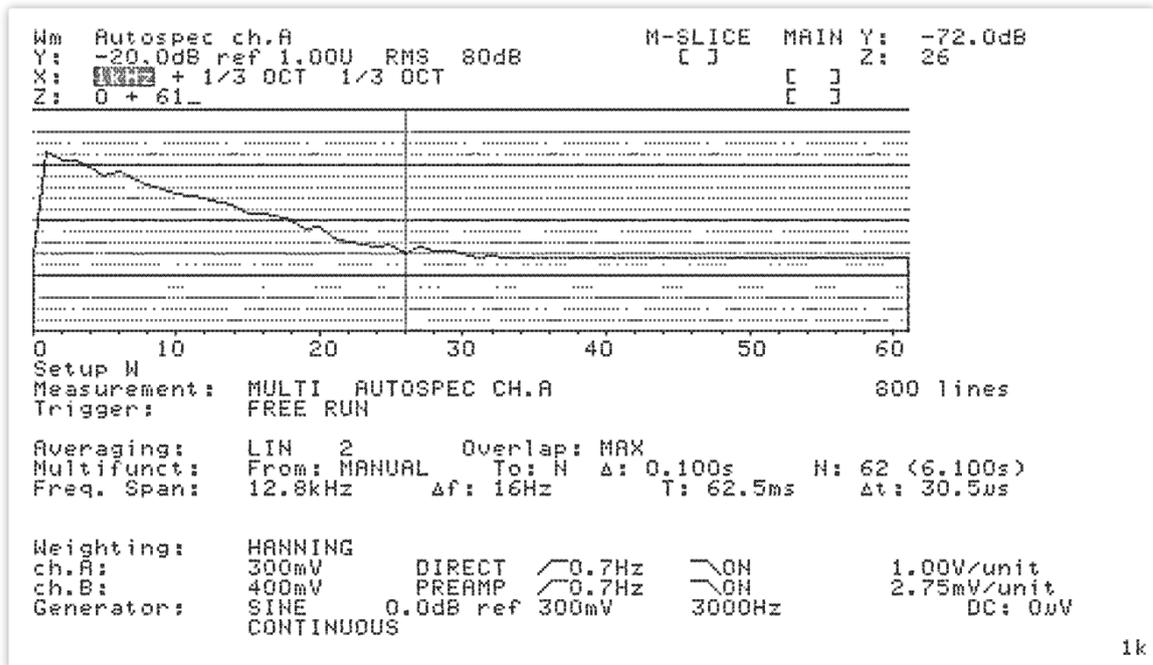


Figura 4.15 Previsualización de respuesta en el tiempo - Signal Analyzer Unit Type 2035
Fuente: Laboratorio de Electroacústica PUCP

4.8.3. Resultado de las pruebas

En las figuras 4.16 y 4.17 se muestran los resultados de las pruebas realizadas. Para el caso de la prueba con 2 segundos de tiempo de reverberación se puede apreciar que entre el segundo 1.2 y 3.2, la intensidad decae aproximadamente de -45dB hasta -95dB, lo cual es -50dB. Para el caso de la prueba de 4 segundos como tiempo de reverberación, la intensidad decae aproximadamente de -46dB a -89dB desde el segundo 1.2 y 5.2, lo cual es -43dB.

Del resultado de estas pruebas podemos observar que la pendiente de decaimiento era de -60dB, sin embargo, el ruido de fondo tenía un nivel más elevado, por lo que el decaimiento se desaceleró y terminó la intensidad de la señal tuvo finalmente el mismo valor que el ruido de fondo.

Por lo tanto queda demostrado el correcto funcionamiento del reverberador digital.

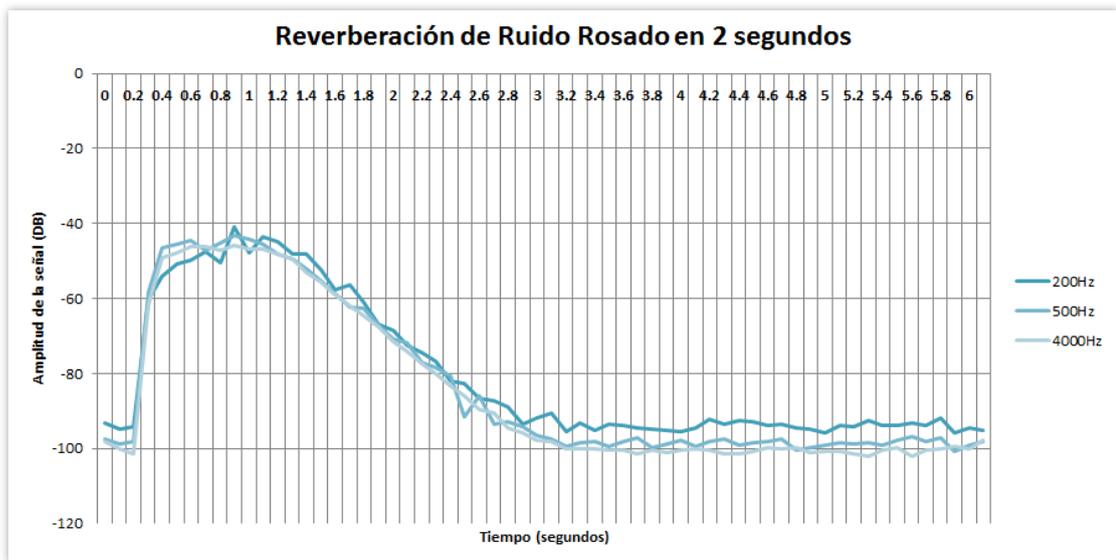


Figura 4.16 Resultados de prueba de 2 segundos de reverberación
Fuente: Elaboración Propia

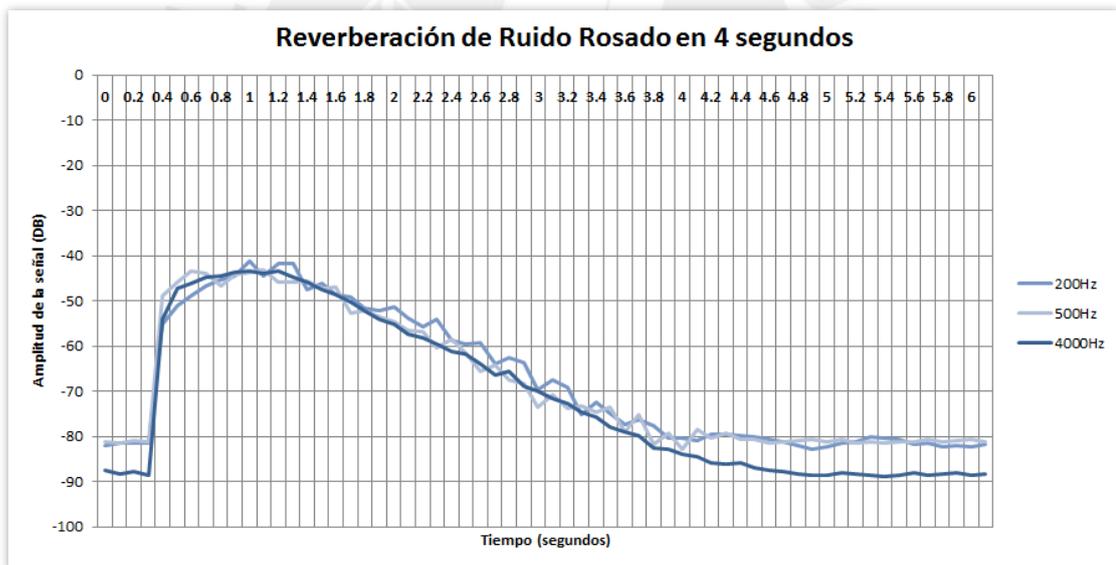


Figura 4.17 Resultados de prueba de 4 segundos de reverberación
Fuente: Elaboración Propia

CONCLUSIONES

Se consiguió diseñar un reverberador digital basado en algoritmos con enfoque sensorial que cuenta con una buena variedad de configuraciones y que cumple de forma demostrable con el control del tiempo de reverberación.

Se logró comprender a fondo el fenómeno acústico de la reverberación y conocer algunos de los algoritmos de reverberación existentes.

Se logró conocer las características del tiempo y frecuencia de los filtros IIR Peine, Pasatodo y Pasabajo, los cuales fueron exitosamente programados en Matlab.

Se logró combinar en Matlab los filtros Pasatodo y Peine para obtener los efectos de tiempo de reverberación y densidad temporal deseados, comprendiendo su relación con las ganancias y retardos de los filtros.

Se modificó el Algoritmo de Schroeder para obtener una salida estereofónica en la que los canales tienen diferencias basadas en combinar de forma distinta los parámetros de los filtros Pasatodo asociados a cada canal.

Se programó el algoritmo de reflexiones tempranas de Griesinger el cual utiliza una versión básica de la función de transferencia de la cabeza humana.

Se consiguió aprender a utilizar la herramienta GUIDE de Matlab para elaborar la interfaz gráfica del reverberador, que utiliza un archivo de sonido como entrada, cuenta con controles de edición de parámetros, y puede reproducir y almacenar el archivo de sonido resultante.

RECOMENDACIONES

El reverberador digital desarrollado tiene aún muchas posibilidades de mejora, las cuales pueden brindar mayor versatilidad a los efectos disponibles.

Para empezar, es posible que todos los parámetros preconfigurados sean variables, en específico las ganancias y retardos de aquellos filtros que no están directamente relacionados con el tiempo de reverberación. Así por ejemplo, se podría incluir un control adicional en la interfaz gráfica en la que se configure el valor de ganancia y de retardo de cada una de las seis reflexiones tempranas.

Si lo que se desea es dar un tratamiento diferenciado por banda de frecuencia, esto sería posible definiendo la cantidad de bandas a usar, y conectar la entrada de sonido a una serie de filtros pasabanda en paralelo, y la salida de cada uno de estos filtros estaría acoplada a la entrada de un reverberador tal como el que fue diseñado en este documento.

Con respecto a las formas para aplicar el reverberador en un entorno que no sea MATLAB, una opción interesante sería programar un VST, que es un software que debe ser ejecutado mediante una aplicación que soporte esta tecnología. A esta aplicación se le llama VST Host, y se trata de los programas ya existentes para edición de audio digital.

Otra opción también muy interesante sería implementar el reverberador en un procesador DSP y diseñar una interfaz atractiva de acuerdo al público objetivo. Y si queremos aprovechar aún más las tendencias del mercado a nivel global, el reverberador digital podría estar disponible vía Internet de tal forma que se realice la programación en un servidor web usando por ejemplo PHP y Java, y se cuente con una amigable interfaz gráfica exclusiva para usuarios registrados. También sería interesante desarrollar una aplicación para teléfonos inteligentes y tabletas, que en los últimos años han empezado a formar parte de la vida cotidiana de un gran número de personas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] MARTÍNEZ NÚÑEZ, L. R.
2007 Procesamiento Digital y Control Gestural en Tiempo Real Utilizando una PC con Drivers ASIO para Efectos de Audio. Tesis Licenciatura. Ingeniería en Electrónica y Computadoras. Universidad de las Américas. Departamento de Computación, Electrónica, Física e Innovación, Escuela de Ingeniería y Ciencias. Puebla.
- [2] CORTES MILLAN, David E. et al.
2008 Diseño e implementación de prototipo funcional de reverberador por convolución en tiempo real. Universidad de San Buenaventura Programa de Ingeniería de Sonido, Facultad de Ingeniería. Bogota.
- [3] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION
2007 ISO 3382 1997, Acoustics - Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters.
- [4] BEHRINGER
2009 VIRTUALIZER PRO DSP-2024P [en línea]
[consultado 22/04/2009]
<<http://www.behringer.com/EN/Products/DSP2024P.aspx>>
- [5] ALESIS
2009 MicroVerb4 Preset/Programmable 18-Bit signal processor.
[en línea] [consultado 22/04/2009]
<<http://www.alesis.com/microverb4>>
- [6] YAMAHA CORPORATION OF AMERICA
2009 SPX2000 Professional Multi-effect processor. [en línea] [consultado 22/04/2009]
<<http://www.yamaha.com/yamahavn/CDA/ContentDetail/ModelSeriesDetailPF.html?CNTID=23007&CTID=228900>>
- [7] TC ELECTRONICS
2009 M3000 Studio Reverb Processor [en línea]
[consultado 04/05/2009]
<<http://www.tcelectronic.com/m3000features.asp>>
- [8] IK MULTIMEDIA PRODUCTION
2009 CSR Classik Studio Reverb: A high-end reverb suite for any studio. [en línea] [consultado 04/05/2009]
<<http://www.ikmultimedia.com/csr/features/>>
- [9] PROAKIS, John G. y MANOLAKIS, Dimitris G.
1996 Digital Signal Processing : Principles, Algorithms and Applications. New Jersey: Prentice – Hall, Inc.

- [10] BLAUERT Jens y XIANG, Ning
2008 Acoustics for Engineers
Berlin: Springer
- [11] RAYMOND A. Serway, et al.
2001 FÍSICA
Pearsen Educación.
- [12] DAVIS, Gary y JONES, Ralph.
1990 The sound reinforcement handbook. Second edition.
Escrito para Yamaha Corporation of America.
Milwaukee: Hal Leonard Publishing Corporation.
- [13] SUNDARAJAN, D.
2003 Digital Signal Processing: Theory and Practice.
World Scientific Publishing.
- [14] THE MATHWORKS
2009 MATLAB® 7 Getting Started Guide
Natick: The MathWorks Inc.
- [15] THE MATHWORKS
2009 SIMULINK® 7 Getting Started Guide
Natick: The MathWorks Inc.
- [16] THE MATHWORKS
2009 Creating Graphical User Interfaces [en línea]
[consultado 16/11/2009]
<http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/techdoc/creating_guis/bqz79mu.html>
- [17] ACOUSTICS.COM
2005 Reverberation Time.com [en línea] [consultado 18/05/2009]
<<http://www.reverberationtime.com/>>
- [18] BARLETTE, Jenny
2005 Practical recording techniques
Focal Press
- [19] KAHRS, Mark
2002 Applications of Digital Signal Processing to Audio and Acoustics
New York: Kluwer Academic Publishers
- [20] DIMITRIS G. Manolakis y VINAY K. Ingle
2011 Applied Digital Signal Processing: Theory and Practice
New York: Cambridge University Press
- [21] SMITH, Steven W.
1997 The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing
California: California Technical Publishing

- [22] BEHRINGER
2014 VIRTUALIZER 3D FX2000 [en línea]
[consultado 13/12/2014]
<<http://www.behringer.com/EN/Products/FX2000.aspx>>
- [23] YAMAHA CORPORATION OF AMERICA
2009 SPX2000 Professional Multi-effect processor. [en línea]
[consultado 13/12/2014]
<http://usa.yamaha.com/products/live_sound/processors/spx2000/spx2000/>
- [24] TC ELECTRONICS
2014 M3000 Studio Reverb Processor [en línea]
[consultado 13/12/2014]
<<http://www.tcelectronic.com/m3000/>>
- [25] IK MULTIMEDIA PRODUCTION
2014 CSR Classik Studio Reverb [en línea]
[consultado 04/05/2009]
<<http://www.ikmultimedia.com/products/csr/>>

