

**BANCO SÍNTESIS DE FORMAS DE ONDA PARA AUDIO**

**NAZLY RENATA YAYA PINILLA**

**FUNDACIÓN UNIVERSITARIA SAN MARTÍN  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
BOGOTÁ  
2010 I**

**BANCO DE SÍNTESIS DE FORMAS DE ONDA PARA AUDIO**

**NAZLY RENATA YAYA PINILLA  
041076  
YAYISRENATIS@HOTMAIL.COM**

**MONOGRAFÍA**

**ASESOR TÉCNICO  
JESÚS RODOLFO ROJAS OSORIO**

**FUNDACIÓN UNIVERSITARIA SAN MARTÍN  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
BOGOTÁ  
2010 I**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

---

---

**Ing. Jesús Rodolfo Rojas Osorio**  
**Asesor**

---

**Ing. Joaquín Fernando Sánchez**  
**Jurado 1**

---

**Ing. Jorge Arévalo Aldana**  
**Jurado 2**

Bogotá (08, 06, 2010)

*A Dios mi guía y fortaleza  
A mis padres Nubia e Isaac  
A mis hermanos Samir y Paula  
Y a mi sobrino Samuel  
Por ser parte de mi vida y de mí proceso profesional*

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco la ayuda prestada en la realización de este proyecto al Ingeniero Jesús Rodolfo Rojas por su asesoría, a mi mamá por su formación, sus enseñanzas y su incondicional amor, a mi papá por brindarme su apoyo, a mis hermanos por su compañía y ayuda, a mi novio Andrés por su apoyo y fortaleza y a cada uno de los profesores, compañeros y amigos que fueron parte de mi formación como profesional y persona muchas gracias.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	16
1 PROBLEMA	17
2 JUSTIFICACIÓN	18
3 OBJETIVOS	19
3.1 OBJETIVO GENERAL	19
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
4 MARCO REFERENCIAL	20
4.1 ANTECEDENTES	20
4.2 MARCO CONCEPTUAL	22
4.2.1 El sonido	22
4.2.2 Tarjetas de sonido	26
4.2.3 Síntesis digital de sonido	27
4.2.4 Formato wav	28
4.3 MARCO TEÓRICO	28
4.3.1 Análisis del sonido	28
4.3.2 Transformada de Fourier a corto plazo	29
4.3.3 Visualización en una ventana	33
4.3.4 Síntesis Granular	36

4.4	ESTADO DEL ARTE	36
4.4.1	Análisis mediante Transformada Wavelet	36
4.5	LIMITACIONES Y ALCANCES	38
5	DISEÑO METODOLÓGICO	39
6	DESARROLLO	41
6.1	SELECCIÓN DEL SOFTWARE	42
6.2	MANIPULACIÓN DE ARCHIVOS DE AUDIO	42
6.2.1	Leer archivos de audio en MATLAB	42
6.2.2	Guardar archivos de audio en MATLAB	43
6.3	ANÁLISIS DE LA SEÑAL ORIGINAL	44
6.3.1	Características del ventaneo	47
6.3.2	Transformada discreta de Fourier	52
6.3.3	Explicación del análisis de la señal de audio en MATLAB	59
6.4	SÍNTESIS DE LA SEÑAL DE AUDIO	60
6.4.1	Función granular en MATLAB	61
6.4.2	Explicación de la señal sintetizada en MATLAB	62
6.5	INTERFAZ GRÁFICA DE ANÁLISIS Y SÍNTESIS DE LA SEÑAL	63
7	PRUEBAS Y RESULTADOS	66
7.1	PRUEBA SOBRE LA SEÑAL DE AUDIO	66
7.2	PRUEBA DE UNA SEÑAL DE AUDIO DE UNA FLAUTA	66

7.2.1	Objetivo de la prueba	66
7.2.2	Herramientas	66
7.2.3	Procedimiento	67
7.2.4	Resultados esperados	67
7.2.5	Resultados obtenidos	67
7.1.1	Resultados obtenidos	68
7.3	PRUEBA DE SEÑAL DE AUDIO DE LA VOZ DE UNA CANTANTE	70
7.3.1	Objetivo de la prueba	70
7.3.2	Herramientas	70
7.3.3	Procedimiento	70
7.3.4	Resultados esperados	71
7.3.5	Resultados obtenidos	71
7.4	PRUEBA DE UNA SEÑAL SINTETIZADA DE UN PIANO	74
7.4.1	Objetivo de la prueba	74
7.4.2	Herramientas	74
7.4.3	Procedimiento	74
7.4.4	Resultados esperados	74
7.4.5	Resultados obtenidos	74
7.5	PRUEBA DE UNA SEÑAL DE AUDIO DE AGUA CON PÁJAROS	77
7.5.1	Objetivo de la prueba	77

7.5.2	Herramientas	77
7.5.3	Procedimiento	77
7.5.4	Resultados esperados	78
7.5.5	Resultados obtenidos	78
8	CONCLUSIONES	81
9	RECOMENDACIONES	82
	GLOSARIO	83
	BIBLIOGRAFÍA	86
	ANEXOS	89

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Amplitud onda sonora	23
Figura 2. Bandas de frecuencia audibles	24
Figura 3. Comparación entre frecuencia, sonido y vibración	24
Figura 4. Tarjeta de sonido Sound Blaster	26
Figura 5. Banco de filtros de M-canales	30
Figura 6. Descomposición de una señal en un sistema de rebanadas sin traslapo de frecuencia	31
Figura 7. Características del espectro de la ventana	35
Figura 8. Tipos de Wavelet	37
Figura 9. Diagrama de bloques desarrollo del proyecto	41
Figura 10. Datos obtenidos de una señal de audio	43
Figura 11. Señal de audio en tiempo	43
Figura 12. Señal en el dominio del tiempo y de la frecuencia	44
Figura 13. Señal de audio multiplicada por la ventana hamming	46
Figura 14. Transformada rápida de Fourier	46
Figura 15. a) Lóbulo ventana Rectangular b) Lóbulo ventana Hamming c) Lóbulo ventana Hanning d) Lóbulo ventana Blackman	48
Figura 16. Formas de las diferentes ventanas	49
Figura 17. a) Ventana Rectangular b) Ventana Hamming c) Ventana Hanning d) Ventana Blackman	51
Figura 18. Comparación entre DFT y FFT	56
Figura 19. Secuencia original DFT en el dominio del tiempo	58
Figura 20. (a) Fase de las muestras DFT y (b) Magnitud de las muestras DFT	58
Figura 21. Señal de audio sintetizada mediante granos	60
Figura 22. Interfaz gráfica de señal original y análisis en frecuencia	63
Figura 23. Parámetros de la ventana envolvente	64
Figura 24. Señal sintetizada y análisis en frecuencia	64
Figura 25. Señal original	67
Figura 26. Señal sintetizada de la Flauta con el primer parámetro	68

Figura 27. Señal sintetizada de la Flauta con el segundo parámetro	69
Figura 28. Señal sintetizada de la Flauta del tercer parámetro	69
Figura 29. Señal original de la voz de una cantante	71
Figura 30. Señal sintetizada de la voz de la cantante del primer parámetro	72
Figura 31. Señal sintetizada de la voz de la cantante segundo parámetro	72
Figura 32. Señal sintetizada de la voz de la cantante tercer parámetro	73
Figura 33. Señal Original de la síntesis de un piano	74
Figura 34. Señal sintetizada del audio sintetizado del piano primer parámetro	75
Figura 35. Señal sintetizada del audio sintetizado de un piano segundo parámetro	76
Figura 36. Señal sintetizada del audio sintetizado del piano tercer parámetro	76
Figura 38. Señal sintetizada del audio de agua con pájaros primer parámetro	78
Figura 39. Señal sintetizada del audio de agua con pájaros segundo parámetro	79
Figura 40. Señal sintetizada del audio de agua con pájaros tercer parámetro	80

## LISTA DE FÓRMULAS

	pág.
Ecuación 1. Nivel de intensidad del sonido	25
Ecuación 2. Intensidad umbral del oído humano	25
Ecuación 3. Transformada de Fourier a corto plazo	29
Ecuación 4. Reconstrucción de la señal	30
Ecuación 5. DTFT de una secuencia infinita	31
Ecuación 6. Transformada STFT	32
Ecuación 7. Transformada inversa de Fourier en tiempo discreto	32
Ecuación 8. Transformada inversa de Fourier en tiempo discreto con $w(0) \neq 0$	32
Ecuación 9. Convolución de la transformada STFT	32
Ecuación 10. Parámetros de la ventana rectangular	33
Ecuación 11. Transformada de Fourier de la ventana rectangular	33
Ecuación 12. Función de la ventana Hanning	34
Ecuación 13. Función de la ventana Hamming	34
Ecuación 14. Función de la ventana Blackman	34
Ecuación 15. Función de la ventana Bartlett	34
Ecuación 16. Función de la ventana Kaiser	35
Ecuación 17. Transformada discreta de Fourier DFT	53
Ecuación 18. Ejemplo cálculo matemático de DFT	53

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Relación entre las cualidades del sonido y los parámetros físicos	23
Tabla 2. Proceso de adquisición señal de audio	42
Tabla 3. Guardar archivos de audio	43
Tabla 4. Transformada corta de Fourier	45
Tabla 5. Características fijas de algunas funciones de las ventanas	47
Tabla 6. Tipos de ventana	49
Tabla 7. Ventaneos en Matlab	50
Tabla 8. Ejemplo de la DFT en MATLAB	54
Tabla 9. Transformada discreta de Fourier con el algoritmo FFT en MATLAB	55
Tabla 10. Funciones preestablecidas en MATLAB	56
Tabla 11. Implementación en MATLAB de la FFT	57
Tabla 12. Implementación en MATLAB del análisis de la señal	59
Tabla 13. Función generar granos	61
Tabla 14. Descripción señal sintetizada	62
Tabla 15. Parámetros que se variaron en la señal de audio de la Flauta	68
Tabla 16. Parámetros que se variaron en la señal de audio de la cantante	71
Tabla 17. Parámetros que se variaron en la señal de audio sintetizada	75
Tabla 18. Parámetros que se variaron en la señal de audio de agua con pájaros	78

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1 Guía para utilizar la interfaz gráfica	89

## RESUMEN

La herramienta que se desarrolló en el proyecto de grado está compuesta por dos etapas. La primera es la de análisis de la señal original, donde se puede observar la simulación de la señal de audio en tiempo y su respectivo análisis en frecuencia utilizando la transformada corta de Fourier. Mediante una interfaz gráfica se permite al usuario seleccionar el archivo de audio de uno (1) a cinco (5) segundos de duración y escucharlo.

En la segunda etapa se realiza la síntesis de la señal original, en esta se tiene una señal ventana que permite tomar segmentos de sonidos cortos, mediante la información que se extrajo de los segmentos se reconstruye la señal, en esta etapa el usuario puede manipular las características de la envolvente como son el número de ventanas, sus límites superior e inferior y su ancho que predicen el comportamiento de la señal sintetizada.

Al desarrollar las dos etapas el usuario puede generar formas de onda diferentes para alimentar el banco de tonos.

## INTRODUCCIÓN

La mayoría de software y herramientas de procesamiento de señales de audio están dirigidas hacia un mercado de audio profesional, lo que quiere decir que no se pueden adquirir en todos los sectores de la industria, aunque existen herramientas como los computadores que poseen una tarjeta de sonido interna encargada del análisis y síntesis del sonido reconstruyendo los tonos, los usuarios no pueden observar el procesamiento que realiza la tarjeta.

La herramienta que se desarrollará, permite al usuario observar las características de la señal de audio en tiempo y su análisis en frecuencia, además se podrán generar formas de onda diferentes a la original mediante la síntesis. Al realizar una herramienta como esta se estaría implementando el sistema que se encuentra en las tarjetas de sonido pero de una forma más asequible para el público, donde no se reconstruye la señal que se tiene guardada, sino que se genera una nueva a partir del archivo de audio.

El banco de síntesis de formas de onda para audio, está dirigido a estudiantes, docentes, ingenieros o conocedores de la música que quieren sintetizar tonos o adquirir tonos nuevos para ser utilizados en otras herramientas que se encargan de integrarlos para formar melodías.

## 1 PROBLEMA

Con el nuevo avance de la tecnología y la variedad de ritmos que se han generado en los últimos tiempos se tienen nuevas alternativas para construir un espacio musical en casa.

En el mercado hay una gran variedad de equipos y programas profesionales y semiprofesionales para audio que solo están al alcance de los estudios de grabación y de los grandes conocedores del tema, ya que ellos tienen la capacidad económica de adquirirlos. Las tarjetas de sonido son más asequibles al público y tienen un sistema que se encarga del análisis y síntesis de las señales de audio para comprimir el espacio utilizado por estas, luego las señales son reconstruidas para poder ser escuchadas pero no es posible generar nuevos sonidos.

Los músicos desarrollan sus proyectos buscando armonía en cada uno de sus instrumentos, pero la mayoría de ellos no tienen la posibilidad económica de adquirir herramientas especializadas para poder manejar las señales de audio y lograr una buena calidad sonora.

El avance en herramientas de bajo costo se encuentra estancado y alejado de muchos que podrían ser forjadores de nuevas alternativas musicales, aunque existen software especializados dedicados al manejo de gamas de tonalidades y de sus características, estos son de alto costo y no se consiguen con facilidad, uno de los problemas principales de estos programas es que su utilización es muy compleja y se necesita de varios años para lograr manejar adecuadamente sus herramientas.

Otra de las falencias en este campo se debe a que los interesados en la música no tienen la posibilidad de adquirir una herramienta que les brinde facilidades en el manejo y creación de formas de onda, siendo difícil para el usuario conseguir tonos con las características que desea.

Si no se desarrolla una herramienta que permita manejar las señales de audio con facilidad y sin necesidad de pagar grandes cantidades de dinero, tal vez será muy difícil encontrar tonos que permitan realizar nuevos ritmos.

Por eso es necesario hacer un sistema que permita la síntesis de formas de onda (banco de tonos), una herramienta sencilla de utilizar, ahorrando no solo tiempo sino dinero, además el usuario tendrá al alcance de sus manos un sistema que tienen incorporadas las tarjetas de sonido y que se dedica a trabajar las forma de onda, permitiéndole utilizar una herramienta de este tipo con mucha facilidad.

## 2 JUSTIFICACIÓN

El sonido hace parte de nuestra vida, escuchar una linda melodía o poder realizar creaciones musicales permite que desnudemos nuestra alma a un mundo más abierto con nuevas alternativas y formas de arte.

Un nicho de mercado importante y determinante musicalmente es el doméstico el cual se encuentra estancado, por eso el propósito de este proyecto es poner en las manos del usuario la parte más importante de la tarjeta de sonido, su corazón, encargada del análisis y síntesis de tonos, lo que quiere decir que las personas que les gusta la música tendrán la posibilidad de realizar la síntesis de formas de onda de manera práctica, analizando las características de la señal tanto en tiempo como en frecuencia y manipulando algunos parámetros para su síntesis obteniendo así nuevas formas de onda.

La principal particularidad de esta herramienta es que lleva una técnica que es utilizada en un sistema profesional a uno de baja gama, permitiendo a cualquier persona manipular los archivos de audio y generar nuevos tonos a partir de la síntesis que se les realiza.

## **3 OBJETIVOS**

### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Diseñar y simular un sistema que permita la síntesis de formas de onda (banco de tonos) dentro del espectro del audio.

### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Identificar las características de la transformada de Fourier a corto plazo (STFT) para generar armónicos simples.
- Identificar las características de la transformada de Fourier en forma discreta (DFT) para obtener las frecuencias de muestreo.
- Determinar los parámetros que se necesitan para generar tonos en el espectro del audio.
- Identificar el tipo y la longitud de la ventana que se va a aplicar para obtener formas de onda adecuadas para el banco de síntesis.
- Implementar dentro del sistema una herramienta que permita la manipulación de las características de la señal de sonido.

## 4 MARCO REFERENCIAL

### 4.1 ANTECEDENTES

Inicialmente, los primeros computadores no fueron pensados para manipular el audio y sus características, el único sonido escuchado en ellos era mediante un altavoz interno que únicamente comunicaba los errores del sistema, pero el avance en los computadores fue tan rápido que llegaron a ser la principal herramienta para diferentes aplicaciones del sonido, estos están presentes en todo el proceso de creación musical, composición, grabación, producción y reproducción (Tarazona, 2000).

Los primeros pasos que se dieron fue la implementación del MIDI (interfaz digital de instrumentos musicales) y del disco compacto dos elementos que se han venido utilizando durante muchos años y que tienen una importancia significativa en la evolución de la música en el campo de la informática (Puig, 1997).

Antes del MIDI existían interfaces que permitían la conexión de diferentes instrumentos, estas no tenían características muy avanzadas y eran muy costosas, por eso en 1981 David Smith y Chet Word dieron a conocer su proyecto a varias empresas que fabricaban productos musicales, este consiste en una interfaz universal que puede ser utilizada en todas las marcas de instrumentos permitiendo hacer una interconexión entre ellos, desde ese momento el MIDI se convirtió en una herramienta única para los músicos (Salomón, 1992).

Luego de esta herramienta tan primordial para el campo musical, se creó en 1985 el Commodore Amiga, el primer computador que agregó ciertas posibilidades de audio digital, este tenía cuatro conversores digital/análogo de 8bits, carecía de convertidores análogo/digital lo que solo permitía reproducir música, para otras aplicaciones era necesario comprar un dispositivo adicional que permitiera muestrear el sonido pero tenían una limitación de velocidad que solo admitía realizar este muestreo en memoria RAM y no en el disco duro por lo que la duración de los sonidos era muy limitada (Puig, 1997).

En 1987 se fueron mejorando las ideas respecto al sonido y la necesidad de incorporar audio a los computadores fue creciendo ya que el auge de los juegos de video avanzaba muy rápido y era esencial obtener más realismo en estos, por eso la primera tarjeta en incorporarse al mercado fue la Music Synthesizer de AdLib, esta tenía una técnica de síntesis por modulación de frecuencias (síntesis FM), lo que permitía reproducir música desde MIDI y generar algunos sonidos simples de fondo con una calidad bastante mala lo que no favorecía el mercado de los video juegos ya que los efectos eran poco convincentes y estos necesitaban de sonidos realistas (Díaz, 2006).

En 1989 la empresa Creative Labs que había trabajado sobre la síntesis de voz, incorporo al mercado la primera tarjeta de sonido Sound Blaster que además de tener una técnica de modulación FM también permitía la grabación y reproducción de audio digital (en 8 bits), lo que permitía que los video juegos tuvieran sonidos auténticos con efectos verdaderamente reales. Esta tarjeta tuvo un éxito inalcanzable, por eso desde ese año todas las tarjetas que se incorporen deben ser compatibles con Sound Blaster, ya que los fabricantes de juegos y otros software programaban con respecto a este sistema (Puig, 1997).

En ese mismo año se lanzó al mercado una tarjeta de sonido llamada Turtle Beach Multisound orientada al mercado de audio profesional, ya que tenía características superiores a las anteriores que eran para tipo doméstico, esta tenía incorporado un chip DSP (procesador digital de señales), además ya no usaba síntesis FM sino síntesis mediante tabla de ondas que mejora el rendimiento de la tarjeta obteniendo sonidos más realistas, permitía la grabación y reproducción de audio a 16 bits, su principal problema era que no tenían compatibilidad con la síntesis FM (García, 2000).

Luego se trataron de fabricar muestras sonoras para el mercado doméstico, la Gravis Ultrasound (*GUS*) fue uno de estos ejemplos, tenía una memoria RAM de 256Kb que permitía grabar los sonidos de los instrumentos en un sistema de tabla de ondas, pero tenía un problema muy grave, se podía reproducir sonido a 16 bits pero tenía que ser grabado a 8 bits, lo que no permitía un sonido de calidad, muchos años después se logró subsanar este problema y salieron al mercado Ultrasound Max y Ultrasound Ace con mayor capacidad en memoria RAM (Puig, 1997).

El mercado del audio a 16 bits se volvió muy importante cuando salió al mercado Sound Blaster 16 siendo asequible para el mercado doméstico, está todavía manejaba la técnica de modulación FM, por lo que no aportaba mayor ganancia a la tarjeta, luego Creative Labs sacó al mercado una tarjeta que realizaba un procesamiento digital que permitía tener efectos de brillo en el sonido y lograr compresión de audio (García, 2000).

Muchas de las empresas de instrumentos musicales desarrollaron tarjetas de alta calidad, ya que usaban sonidos de tecnología Wavetable que estaban grabados en la memoria ROM, además tenían una fidelidad envidiable en las reproducciones MIDI (García, 2000).

En el mercado de sonido profesional, se incorporaron tarjetas con capacidades de muy alta calidad, entre ellas está la Digidesign Simple Cell, la cual permitía obtener muestras de onda profesionales; otra de las tarjetas más sobresalientes

fue la Turtle Beach Maui que poseía parámetros para la edición de bancos de sonido (Puig, 1997).

Creative Labs fabricó otras tarjetas en los años 90, estas fueron Sound Blaster 32 PnP que tenía un sonido Wavetable de 1Mb de ROM, con un sintetizador EMU8000, además tenía incorporada síntesis FM y otras plataformas que permitían el manejo del sonido, luego sacaron al mercado Sound Blaster AWE 32 PnP que añade más sonidos y tiene un software para manipular de forma precisa los sonidos, así como un secuenciador MIDI Orchestrator Plus (García, 2000).

La síntesis por modulación de frecuencias FM fue la primera técnica que se utilizó para las tarjetas de sonido, Jhon Chowning patentó esta idea en 1973 y luego fue adquirida por Yamaha, esta compañía duro siete años para diseñar y fabricar un chip que permitiera implementar en tiempo real la idea de Chowning, el chip fue utilizado en los primeros sintetizadores, luego de algunas variaciones se implementó en las tarjetas de sonido. La síntesis FM es un sistema que consta de dos señales, la señal portadora y la señal moduladora, tiene la característica de obtener sonidos reales y naturales con un contenido armónico considerable (Puig, 1997).

## **4.2 MARCO CONCEPTUAL**

### **4.2.1 El sonido**

El sonido es una vibración de las partículas del aire que al tener contacto con el tímpano se transmite al oído; mediante el oído interno y el nervio auditivo permiten que el cerebro interprete estas vibraciones y las convierta en sonidos (Morilla, 2006).

Cuando un cuerpo vibra significa que se está moviendo cerca de su posición original luego de producirse este efecto el volverá a la posición en la que se encontraba.

Los seres humanos reconocen sonidos que tienen vibraciones que oscilan entre frecuencias de 20 y 20.000 Hz, estas pueden ser percibidas por el oído interno, pero el sonido tiene diferentes gamas de frecuencias que el oído no puede distinguir, los sonidos de frecuencias menores de 15 HZ son llamados infrasonidos y las oscilaciones que están por encima de los 20KHz son llamados ultrasonidos (Velásquez & Rodríguez, 2007).

Las ondas de sonido pueden propagarse de forma transversal donde su movimiento va de un extremo a otro, o del centro hacia fuera, por otro lado están

las de tipo longitudinal, se presentan cuando el movimiento ondulatorio se propaga alejándose del centro, las moléculas que se producen allí se mueven hacia adelante y hacia atrás de forma paralela a el movimiento ondulatorio (Morilla, 2006).

El sonido posee tres cualidades muy importantes utilizadas en el entorno musical estas son: el tono, la intensidad y el timbre, cada una de estas tiene un parámetro físico que lo representa la frecuencia, la amplitud y composición armónica.

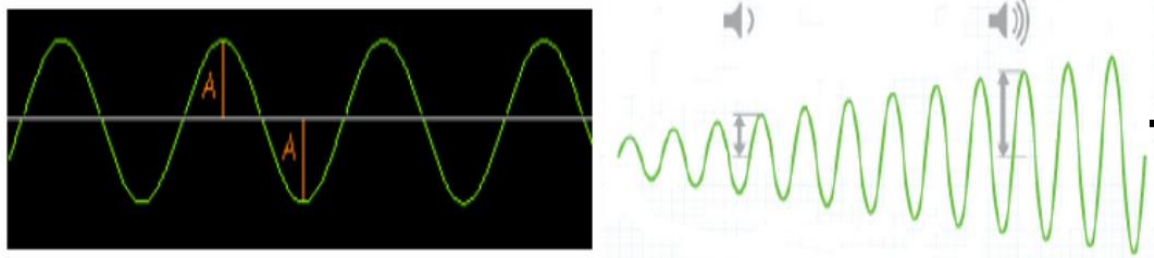
Tabla 1. Relación entre las cualidades del sonido y los parámetros físicos

Cualidades	Parámetros Físicos
Tono	Frecuencia
Intensidad	Amplitud
Timbre	Composición Armónica

#### 4.2.1.1 Características físicas de la onda

La amplitud es la distancia máxima que alcanza la onda, esta se relaciona directamente con la intensidad, entre más grande sea la amplitud de la onda más intensamente golpean las moléculas en tímpano y se escucha más alto el sonido, esto quiere decir que la amplitud y la intensidad son directamente proporcionales (F. J. G. Castillo, 2000).

Figura 1. Amplitud onda sonora



(Camino, 2008)

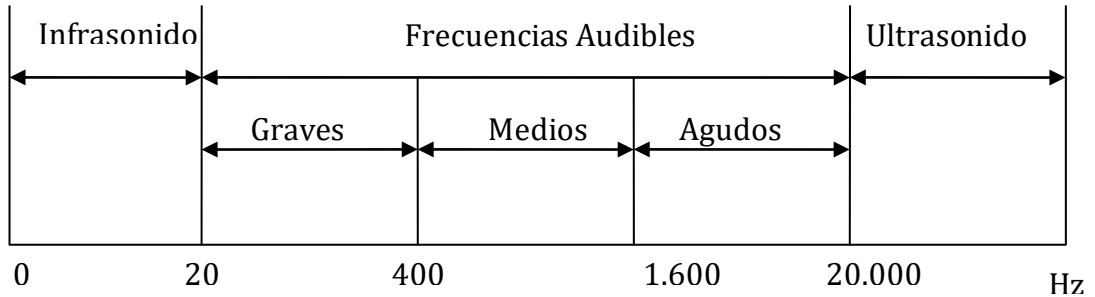
La frecuencia es el número de oscilaciones que realiza la onda sonora por unidad de tiempo, la frecuencia que tienen los sonidos se pueden percibir con los tonos agudos y graves (Szachniewicz, 2002).

La banda de frecuencias audible se dividen en tres regiones: (Isover, 2006)

- Bandas de sonidos graves, con frecuencias entre 20 y 400 Hz.

- Bandas de frecuencias medias, entre 400 y 1.600 Hz.
- Bandas de sonidos agudos, con frecuencias entre 1.600 y 20.000 Hz.

Figura 2. Bandas de frecuencia audibles



(Isover, 2006)

Los sonidos con vibraciones lentas son llamados graves esto quiere decir que tienen frecuencias bajas, y los que tienen vibraciones rápidas corresponden a frecuencias altas y se llaman sonidos agudos (F. J. G. Castillo, 2000).

Figura 3. Comparación entre frecuencia, sonido y vibración



(Camino, 2008)

La forma de onda está determinada por la composición armónica, esta permite determinar las diferencias entre la frecuencia e intensidad de los instrumentos musicales. Por lo general siempre que se realiza una vibración no se obtiene un sonido puro, ya que está compuesto de diferentes frecuencias, estos sonidos son llamados armónicos los cuales permiten que se tenga una interpretación respecto a la calidad del sonido (Camino, 2008).

Otra característica importante para el sonido es la velocidad, esta depende de las características del medio de propagación en la que se está emitiendo el tono.

#### 4.2.1.2 Cualidades del sonido

El tono es representado mediante la frecuencia de la onda, esta cualidad nos permite diferenciar entre un sonido grave y uno agudo. Este se mide en Hertz (ciclos por segundo) (F. J. G. Castillo, 2000).

La intensidad del sonido se relaciona con el flujo de energía sonora por unidad de tiempo, esto quiere decir que la intensidad es la medida de amplitud de la vibración. Su unidad de medida es el decibelio, esta se utiliza para medir la intensidad de sonido, los sonidos que se perciben deben superar los (0dB) y no superar el umbral de dolor de (140 dB) (Szachniewicz, 2002).

Para obtener los rangos de intensidades en decibeles se utiliza la formula en escala logarítmica:

Ecuación 1. Nivel de intensidad del sonido

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

(Szachniewicz, 2002)

Dónde:

$\beta$  = Nivel de intensidad del sonido. Se mide en decibeles dB.

$I$  = Intensidad de cierto sonido

$I_0$  = Intensidad umbral del sonido, es decir, la intensidad más pequeña que puede percibir el oído humano. Su valor es:

Ecuación 2. Intensidad umbral del oído humano

$$I_0 = 10^{-2} \frac{W}{m^2}$$

(Szachniewicz, 2002)

El timbre permite distinguir entre los diferentes tipos de instrumentos que tienen el mismo tono (frecuencia) y la misma intensidad (amplitud) (Galdson, 1997).

## 4.2.2 Tarjetas de sonido

Su función principal consiste en admitir la entrada y salida de sonido, además se pueden grabar sonidos y guardarlos en el computador así como descargar música y reproducirla con alta calidad.

La tarjeta de sonido está compuesta por una placa plana y sobre ella tiene microcircuitos integrados que se encargan de todas las funciones que esta posee, además tienen una serie de conectores funcionales para el computador. Está consta de una salida de audio (color verde) donde se deben conectar los audífonos o altavoces externos, una entrada de audio (color rosa) conexión para el micrófono, una entrada analógica (color azul) para cualquier dispositivo externo, posee un puerto paralelo MIDI que permite la conexión de instrumentos que serán manejados desde el computador, posee una conexión de tipo PCI con el disco duro que permite almacenar los sonidos grabados (Sampieri, 2006).

Figura 4. Tarjeta de sonido Sound Blaster



(Technology, 2003)

La tarjeta no guarda el sonido lo que hace es interpretar lo que está grabado encargándose de que la información que le llega sea gestionada en paquetes de código binario, la calidad del sonido depende de los bits que la tarjeta pueda procesar. Las primeras tarjetas que salieron al mercado procesaban 8 bits, por esa razón no tenían una calidad de sonido tan buena pero en la actualidad se manejan procesamientos de 16 bits, lo que permite tener mayor calidad (Sampieri, 2006).

Para que las tarjetas puedan reproducir sonido deben unir los paquetes de bits que van procesando para que se reconstruya la melodía original. La tarjeta toma fragmentos de la melodía y la va recomponiendo, entre más fragmentos tome mejor será la reconstrucción del sonido. La frecuencia de muestreo es

determinante para tener un sonido óptimo en la reproducción del sonido (Sampieri, 2006).

El MIDI es el formato que utiliza la tarjeta de sonido, este se encarga de la secuencia de las principales notas que lo componen observando sus características principales timbre, velocidad y potencia, es decir este hace un mapa de la canción, la tarjeta de sonido interpreta este mapeo mediante dos tecnologías inicialmente fue utilizada la síntesis FM, y luego se incorporó la síntesis mediante tabla de ondas una alternativa que permite mayor calidad (Sampieri, 2006).

El número que aparece en la marca de las tarjetas indica las voces (polifonía) que corresponde a la variedad de sonidos que la tarjeta puede emitir al mismo tiempo. Las tarjetas más sencillas poseían 20 voces generadas por el sintetizador FM, pero con la llegada de la síntesis Wavetable la cantidad de voces a aumentando considerablemente obteniendo mayor variedad de sonidos con mejor calidad (Sampieri, 2006).

#### **4.2.3 Síntesis digital de sonido**

La ventaja principal que ofrece la tecnología digital es diseñar sonidos con un alto nivel de precisión y tonicidad. El computador permite crear sonidos mediante el proceso de diseño o creación numérica denominado síntesis (Cádiz, 2008b).

Numerosas técnicas y algoritmos se han desarrollado alrededor del concepto de síntesis digital un criterio de clasificación muy utilizado se divide en tres técnicas principales: abstracta, modelos físicos y modelos espectrales (Cádiz, 2008b).

En la técnica abstracta se incluyen los procesos más clásicas de síntesis en las que se utilizan algoritmos matemáticos para generar sonidos, dentro de esta técnica se encuentran la síntesis aditiva, substractiva y modulación, usadas en combinación. En la técnica de modelos físicos se incluyen los algoritmos que se basan en el estudio de las propiedades físicas de los instrumentos y otras fuentes de sonido. En los modelos espectrales se ubican las técnicas que pretenden modelar los sonidos mediante su espectro de frecuencias, este tipo de técnicas requieren de una etapa de análisis antes de realizar la síntesis (Cádiz, 2008b).

En los últimos tiempos se han clasificado detalladamente las técnicas de síntesis, en el libro "Tutorial de música en el computador" su autor Curtis Roads propone la siguiente clasificación:

- Muestreo y síntesis aditiva

- Síntesis mediante múltiples tabla de ondas, síntesis granular, y substractiva.
- Síntesis por modulación.
- Síntesis mediante modelos físicos
- Síntesis por segmento de ondas, síntesis gráfica y estocástica.

Las consideraciones que se deben tener en cuenta para escoger una técnica de síntesis adecuada son:

- La calidad del sonido refiriéndose a la riqueza que posee.
- La flexibilidad para modificar los parámetros que tiene el sonido.
- La generalidad refiriéndose a la capacidad que tiene la técnica para crear una variedad de timbres.
- El tiempo de cómputo o el número de instrucciones para realizar la síntesis.

#### **4.2.4 Formato wav**

Es un formato de audio digital sin compresión de datos desarrollado por Microsoft y IBM utilizado para almacenar música en el PC, la información esta codificada en formato PCM (Pulse Code Modulation), esto quiere decir que cada instante es un número que representa un valor de intensidad sonora (amplitud) del sonido. MATLAB utiliza este formato para poder capturar, leer y guardar las señales de audio (Margüello, 2002).

### **4.3 MARCO TEÓRICO**

#### **4.3.1 Análisis del sonido**

Los sonidos son señales de tiempo variable en el mundo real y de hecho todo su significado se relaciona con la variabilidad en el tiempo. Por lo tanto, es interesante desarrollar técnicas de análisis de sonido que permitan observar algunas de las características principales del sonido en tiempo, para facilitar así tareas como la comprensión, comparación, modificación, y síntesis. Por eso, es importante que los criterios para elegir los parámetros del análisis, tales como la longitud y tipo de ventana sean observados detalladamente (Rocchesso, 2003)

### 4.3.2 Transformada de Fourier a corto plazo

La transformada de Fourier a corto plazo (STFT) es un método utilizado para el análisis, síntesis y modificación de la señal, esta se ha utilizado durante muchos años y sus usos son numerosos (Kahrs & Brandenburg, 2002).

La transformada de Fourier a corto plazo se puede ver como una forma para representar una señal en el dominio del tiempo y la frecuencia. La idea básica para aplicar la STFT consiste en realizar la transformada de Fourier en una porción limitada de la señal, después cambiando de puesto a otra porción de la señal se realiza el mismo procedimiento, entonces la señal es reconstruida por los valores de la transformada de Fourier obtenida en las diversas partes de la señal. (Kahrs & Brandenburg, 2002).

Cuando los valores de la transformada de Fourier se expresan en coordenadas polares, La transformada de Fourier a corto plazo es llamada "Codificador vocal de la fase" (Kahrs & Brandenburg, 2002).

#### 4.3.2.1 Análisis mediante la transformada corta de Fourier (Kahrs & Brandenburg, 2002)

En usos estándar, el análisis de la transformada de Fourier a corto plazo se realiza a una tarifa constante: los instantes de tiempo del análisis  $t_a^u$  regularmente se espacian, es decir,  $t_a^u = uR$  donde R es un incremento fijo del número entero que controla la tarifa del análisis. Sin embargo, en las escalas de tono y en las modificaciones de escala de tiempo, es más fácil utilizar en la síntesis instantes de tiempo regularmente espaciados y no instantes de tiempo uniformes. En la denominada banda de paso, la transformada de Fourier a corto plazo  $X(t_a^u, \Omega_k)$  es definido por:

Ecuación 3. Transformada de Fourier a corto plazo

$$X(t_a^u, \Omega_k) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h(n)x(t_a^u + n) \exp(-j\Omega_k n)$$

(Kahrs & Brandenburg, 2002)

Donde  $h(n)$  es la ventana del análisis y  $\Omega_k = \frac{2\pi k}{N}$ . Se debe tener en cuenta que la transformada de Fourier es en forma discreta siendo el tiempo y la frecuencia discretos. La transformada de Fourier es calculada en N puntos, N debe ser generalmente más larga que la longitud de la ventana del análisis  $h(n)$ .

La transformada de Fourier a corto plazo de la señal debe satisfacer las condiciones ya que la coherencia de la transformada de Fourier normalmente corresponde a la superposición de las señales de corto plazo. En consecuencia, existen muchos métodos para obtener la aproximación de  $y(n)$  desde  $Y(t_s^u, \Omega_k)$ .

La fórmula general de la reconstrucción es la siguiente:

Ecuación 4. Reconstrucción de la señal

$$y(n) = \sum_{u=-\infty}^{\infty} w(n - t_s^u) \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} Y(t_s^u, \Omega_k) \exp(j\Omega_k n - t_s^u)$$

(Kahrs & Brandenburg, 2002)

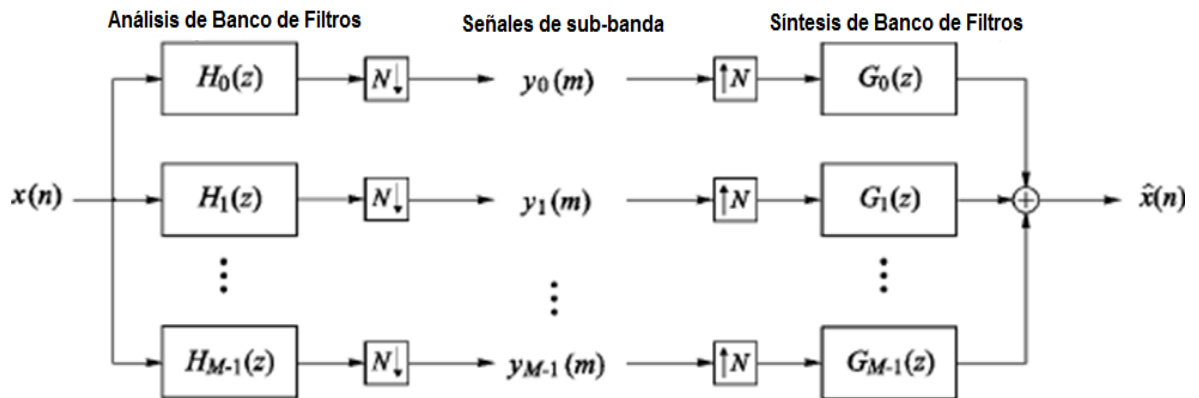
En el que  $w(n)$  es la síntesis de la ventana.

Para simplificar las formulas se va a representar el STFT con la tarifa unitaria de la muestra ( $F_s = T^{-1} = 1$ ). Hay dos vistas complementarias de STFT: la visión del banco de filtros y la visión basada en DFT (Transformada discreta de Fourier).

#### 4.3.2.2 Visión basada en banco de filtros (Mertins, 1999)

El banco de filtros dispone de filtros pasa bajo, pasa banda y pasa altos que son usados para la descomposición y la composición espectral de las señales. Desempeñan un papel importante en muchos usos modernos del tratamiento de señales tales como codificación del audio. La razón de su popularidad es el hecho de que permite la extracción de componentes espectrales al mismo tiempo. La mayoría de bancos de filtro tienen varios valores de muestreo, lo que quiere decir que poseen un sistema multirango.

Figura 5. Banco de filtros de M-canales



(Mertins, 1999)

En la figura 5, se observa un banco de filtro de M-canales, la señal de entrada se descompone en M señales con diversas bandas útiles que se generan por los filtros, así cada una de las señales de sub-banda lleva la información sobre la señal de entrada en una banda de frecuencia particular. Los bloques con las flechas hacia abajo indican un submuestreo de la señal en el factor N y los bloques con las flechas hacia arriba indican upsampling esto quiere decir aumentan en N el índice de muestreo de una señal. El submuestreo por N significa que se están tomando muestras cada  $N$ ésima veces, esto se realiza para reducir o eliminar las redundancias en las sub-bandas M de la señal. El upsampling por N significa la inserción de  $N - 1$  ceros consecutivos entre las muestras. Esto permite recuperar la tasa de muestreo. Los upsamplers son seguidos por los filtros los cuáles substituyen los ceros insertados por valores significativos.

En el caso  $M = N$  se analiza un submuestreo crítico, porque este es el máximo submuestreo que se puede lograr para tener una reconstrucción perfecta de la señal. Se dice que es una perfecta reconstrucción si la señal de salida es una copia de la señal de entrada sin más distorsión que un leve cambio en el tiempo y en la amplitud de la escala.

#### 4.3.2.3 Visión basada en DFT (Rocchesso, 2003)

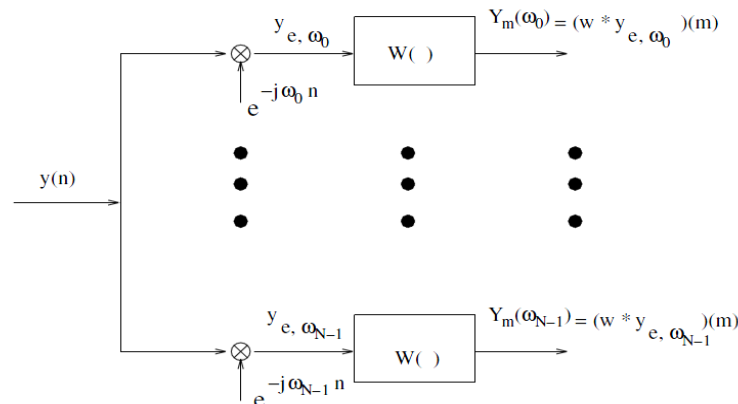
En la figura 6, se puede observar la transformada de Fourier de una secuencia con ventanas. La DFT (Transformada discreta de Fourier) de una secuencia infinita es:

Ecuación 5. DTFT de una secuencia infinita

$$Y(w) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} y(n)e^{-jwn}$$

(Rocchesso, 2003)

Figura 6. Descomposición de una señal en un sistema de rebanadas sin traslapo de frecuencia



(Rocchesso, 2003)

Si la transformada discreta de Fourier se computa en una porción de  $y(\cdot)$ , mediante la ventana del análisis  $w(m-n)$ , se obtiene la transformada corta de Fourier de la siguiente forma:

Ecuación 6. Transformada STFT

$$Y_m(w) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} w(m-n)y(n)e^{-jwn} = e^{-jwn} \sum_{r=-\infty}^{+\infty} w(r)y(m-r)e^{jwr}$$

(Rocchesso, 2003)

Donde el tercer miembro de la igualdad se obtiene por definición  $r \stackrel{\Delta}{=} m-n$ , y  $m$  es una variable que explica la separación temporal de la ventana. Por lo tanto, la STFT resulta ser una función de dos variables, una se puede pensar como la frecuencia y la otra es esencialmente un cambio en el tiempo.

La transformada discreta de Fourier es una función periódica de una variable continua, puede ser invertido por medio de una integral computada durante un período.

Ecuación 7. Transformada inversa de Fourier en tiempo discreto

$$w(m-n)y(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} Y_m(w)e^{jwn} dw$$

(Rocchesso, 2003)

Por una alineación apropiada de la ventana ( $m=n$ ) podemos decir que si  $w(0) \neq 0$  se obtiene:

Ecuación 8. Transformada inversa de Fourier en tiempo discreto con  $w(0) \neq 0$

$$y(n) = \frac{1}{2\pi w(0)} \int_{-\pi}^{\pi} Y_n(w)e^{jwn} dw$$

(Rocchesso, 2003)

La transformada de Fourier a corto plazo STFT en su formulación (Ecuación (9)) puede ser vista como la convolución:

Ecuación 9. Convolución de la transformada STFT

$$Y_m(w) = (w * y_e)(m)$$

(Rocchesso, 2003)

Donde  $y_e(n) = y(n)e^{-j\omega n}$  es la señal demodulada. Si  $\omega$  se ajusta a la respuesta al impulso del filtro pasa bajo ideal, y si  $\omega = \omega_K$ , se conseguirá un canal de banco de filtros. En general,  $w(\cdot)$  es la respuesta al impulso de un filtro no ideal pasa bajo.

En la práctica, se necesita computar el STFT en un sistema finito de  $N$  puntos. Lo que sigue es asumir que la ventana es  $R \leq N$ , de modo que se pueda utilizar el DFT en  $N$  puntos, así se obtiene un muestreo en el eje de las frecuencias entre 0 y  $2\pi$  en múltiplos de  $2\pi/N$ .

### 4.3.3 Visualización en una ventana

Para analizar las frecuencias presentes en la señal es mejor hacerlo por tramos, ya que de esta forma es más sencillo encontrar la información de frecuencia en un tiempo determinado, para realizar este proceso se hace un ventaneo, es decir se aplica sobre una parte la señal la función ventaneo. Existen diferentes tipos de ventanas cada una posee parámetros diferentes y permiten mejor rendimiento en determinadas frecuencias.

La ventana rectangular es usada para alcanzar el truncamiento simple de la respuesta al impulso ideal:

Ecuación 10. Parámetros de la ventana rectangular

$$w_R[n] = \begin{cases} 1, & 0 \leq |n| \leq M, \\ 0, & \text{Para todos} \end{cases}$$

(Mittra, 1998)

La ventana rectangular tiene una transición precipitada a cero, el comportamiento oscilatorio se puede explicar fácilmente examinando la función rectangular de la ventana presentada en la ecuación 11.

Ecuación 11. Transformada de Fourier de la ventana rectangular

$$\gamma_R(e^{j\omega}) = \sum_{n=-M}^M e^{j\omega n} = \frac{\sin\left([2M+1]\frac{\omega}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\omega}{2}\right)}$$

(Mittra, 1998)

La respuesta en frecuencia tiene un estrecho margen "lóbulo principal" centrado en  $\omega = 0$ . Todas las demás ondas de respuesta en frecuencia se llaman lóbulos laterales. El lóbulo principal se caracteriza por su anchura  $4\pi/(2M+1)$  definida por el primer cruce por cero de ambos lados  $\omega = 0$ . Por lo tanto, cuando  $M$  aumenta, la anchura del lóbulo principal disminuye según lo deseado. Sin embargo, el área

debajo de cada lóbulo sigue siendo constante, mientras que la anchura de cada lóbulo disminuye con un aumento en  $M$ . Esto quiere decir, que con el aumento de  $M$ , las ondulaciones alrededor de  $H_t(e^{jw})$  presentan ciertas discontinuidades pero sin disminución en la amplitud.

Se debe tener en cuenta que idealmente la transformada de Fourier de la función de la ventana debe asemejarse a una función impulso centrada en  $w = 0$ , con su longitud  $2M+1$  siendo lo más pequeña posible para reducir la complejidad computacional del filtro.

En la práctica, el análisis de la señal se realiza raramente usando ventanas rectangulares, porque su respuesta de frecuencia tiene lóbulos laterales que son visiblemente altos lo que introduce errores en los componentes de frecuencia.

En estos casos debe existir una compensación entre la anchura del lóbulo principal y el nivel del lóbulo lateral que pueden ser manipulados eligiendo o diseñando una ventana apropiada. Las ventanas que aplican diferentes funciones para lograr el suavizado deseado son Hamming, Blackman, Hanning, Kaiser, Barlett entre otras.

A continuación se mostrarán las funciones de cada una de las ventanas que conservan la longitud de  $2M + 1$  utilizada en la ventana rectangular.

Ecuación 12. Función de la ventana Hanning

$$w[n] = \frac{1}{2} \left[ 1 + \cos\left(\frac{2\pi n}{2M+1}\right) \right]$$

(Mitra, 1998)

Ecuación 13. Función de la ventana Hamming

$$w[n] = 0.54 + 0.46 \cos\left(\frac{2\pi n}{2M+1}\right)$$

(Mitra, 1998)

Ecuación 14. Función de la ventana Blackman

$$w[n] = 0.42 + 0.5 \cos\left(\frac{2\pi n}{2M+1}\right) + 0.08 \cos\left(\frac{4\pi n}{2M+1}\right)$$

(Mitra, 1998)

Ecuación 15. Función de la ventana Bartlett

$$w[n] = 1 - \frac{|n|}{M+1}$$

(Mitra, 1998)

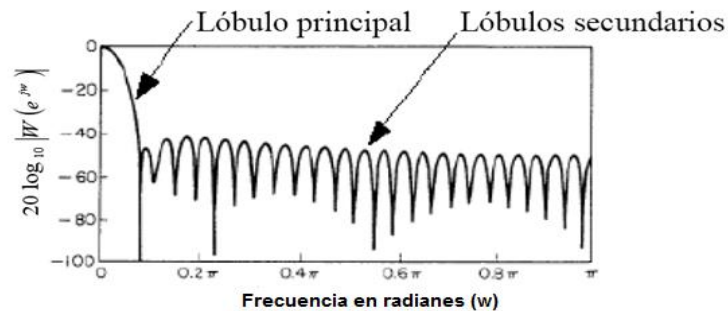
Ecuación 16. Función de la ventana Kaiser

$$w[n] = \frac{I_0\left(\beta\sqrt{1-(n/M)^2}\right)}{I_0(\beta)}$$

(Mitra, 1998)

La magnitud del espectro de cada ventana se caracteriza por tener un gran lóbulo principal centrado en  $w=0$  seguido por una serie de lóbulos laterales con amplitudes disminuidas. Dos parámetros que predicen el rendimiento de la ventana son el ancho del lóbulo principal y el nivel relativo del lóbulo lateral que tienen que ver con el diseño del filtro.

Figura 7. Características del espectro de la ventana



(Gené, 2006)

El ancho del lóbulo principal  $\Delta_{ML}$  es la distancia más cercana entre los cruces por cero en ambos lados del lóbulo principal y el nivel relativo de los lóbulos laterales  $A_{sl}$  es la diferencia en  $dB$  entre las amplitudes del lóbulo lateral más grande y el lóbulo principal.

Por otra parte, la banda útil y las ondulaciones de la banda de parada son iguales y la distancia entre la desviación máxima de la banda útil y el valor mínimo de la banda de parada es aproximadamente igual a la anchura  $\Delta_{ML}$  del lóbulo principal de la ventana, con centro en  $w_c$ . La anchura de la banda de transición está definida por:  $\Delta_w = w_s - w_p$ , que es menor que el ancho del lóbulo principal. Por lo tanto, para asegurar una transición rápida entre la banda útil y la banda de parada, la ventana debe tener un ancho pequeño del lóbulo principal, y para reducir la banda útil y las ondulaciones en la banda de parada, el área debajo de los lóbulos laterales debe ser menor.

El ancho del lóbulo principal ( $\Delta w$ ) de la ventana determina la resolución en frecuencia. Una buena atenuación de los lóbulos laterales frente al principal evita la distorsión en la forma y envolvente del espectro.

#### **4.3.4 Síntesis Granular**

En un fenómeno acústico el sonido está compuesto por miles de partículas o granos que se propagan en el tiempo, el grano dura entre uno y cien milisegundos. La representación granular se utiliza para apreciar fenómenos sonoros con un alto nivel de complejidad, ya que los granos son unidades de energía unidas por tiempo y frecuencia (Prieto & Reyes, 2001).

La noción de granulación fue propuesta por Dennis Gabor, en la teoría se propuso que mediante la representación granular se podía describir un sonido. (Prieto & Reyes, 2001)

En 1960 el compositor Iannis Xenakis fue el primero en explicar la teoría acerca de la composición con granos de sonido y realizó la siguiente observación: "Todos los sonidos se conciben como un ensamble de un gran número de sonidos elementales que están dispuestos en el tiempo." (Prieto & Reyes, 2001)

Luego en 1974, Curtis Roads inicio la implementación de síntesis granular mediante un algoritmo para su aplicación (Prieto & Reyes, 2001).

La técnica de generación de sonido llamada síntesis granular, consiste en dividir un sonido en pequeños segmentos, para luego mediante las características de la señal envolvente extraer los granos generando así nuevos sonidos (Prieto & Reyes, 2001).

La duración de un grano puede ser constante, aleatoria o puede variar dependiendo de la frecuencia, esto significa que se pueden asignar duraciones cortas a los granos. Una envolvente de amplitud da la forma a cada grano de sonido, esta envolvente puede variar en diferentes implementaciones de una curva de tipo campana, una señal Gaussian, o una ventana como la Hamming y Hanning que son las más utilizadas en el caso de un archivo de audio (Prieto & Reyes, 2001)

#### **4.4 ESTADO DEL ARTE**

##### **4.4.1 Análisis mediante Transformada Wavelet**

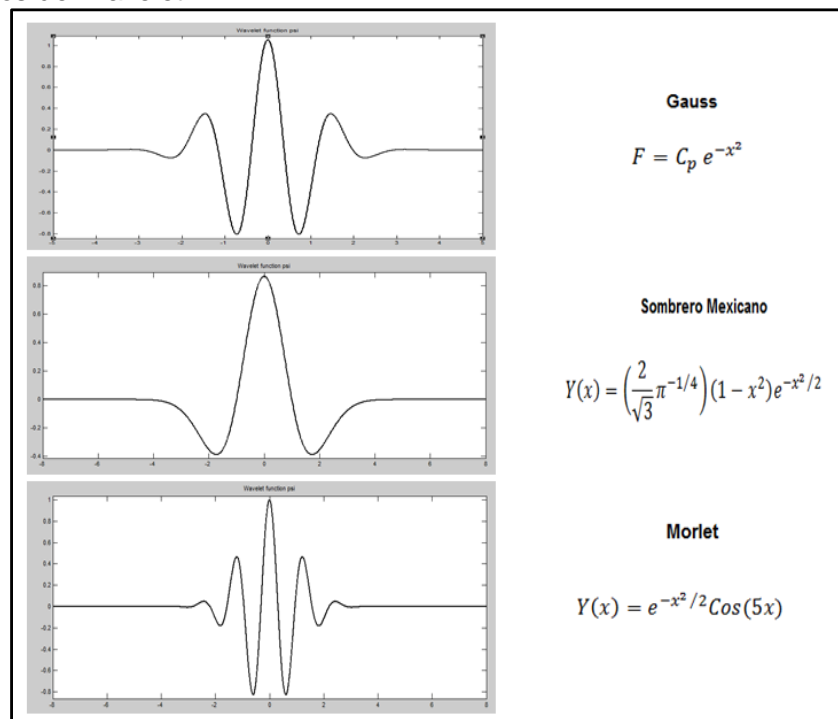
La transformada Wavelet es una técnica relativamente nueva siendo una poderosa herramienta para el análisis sobre el comportamiento local de una señal. La Wavelet es una forma de onda de duración limitada, su objetivo principal es convertir a números o coeficientes la información de la señal que se almacena, transmite o analiza para reconstruir la señal. Una de las ventajas que posee la transformada

Wavelet es ofrecer información tiempo-frecuencia para cada punto de la señal (Cortés, Cano, & Chaves, 2007).

En el análisis de Fourier se toman los coeficientes de senos y cosenos de distintas frecuencias y amplitudes, igualmente el análisis Wavelet descompone la señal en una versión desplazada y escalada de otra señal madre, escogiendo correctamente la señal madre se puede llegar a descomponer la seña de la forma apropiada sin limitarse a las señales seno y coseno (Cortés, Cano, & Chaves, 2007).

La Wavelet permite hacer un análisis localizado en el tiempo, encontrando picos o discontinuidades de la señal que no se detectan con el análisis de Fourier, el análisis mediante Wavelet permite observar aspectos de los datos que en otras técnicas de análisis no es posible (Cortés, Cano, & Chaves, 2007).

Figura 8. Tipos de Wavelet



(Cortés, et al., 2007)

Para reconstruir la señal la Wavelet puede ser de diferentes tamaños o ponerse en diferentes posiciones, igualmente se puede alargar y comprimir la señal para cambiar la frecuencia, gracias a esta facultad se suele decir que es un “microscopio matemático” (Cortés, Cano, & Chaves, 2007).

## **4.5 LIMITACIONES Y ALCANCES**

La principal limitación de la herramienta es que solo se pueden analizar archivos de audio de uno a cinco segundos de duración debido a la capacidad de procesamiento que requiere el proceso de síntesis.

El proyecto permite que a partir de una muestra de audio se puedan sintetizar o crear nuevos tonos o sonidos, esto es posible mediante las características de la señal envolvente que permite tomar segmentos del sonido obteniendo así una nueva señal a partir de sus partes, cada vez que varíen las características de la envolvente se podrá ir alimentando el banco de tonos

Esta herramienta es útil para estudiantes de ingeniería de sonido o personas que necesitan tener una base de sonidos para formar melodías.

## 5 DISEÑO METODOLÓGICO

El proyecto se genera con base en la asignatura DSP, donde se emplea MATLAB para realizar el procesamiento digital de señales teniendo variables preestablecidas que permiten ahorrar tiempo en el momento de la implementación.

Como primer paso, se selecciona el software MATLAB con licencia académica porque es una herramienta que integra cálculos, visualización, y programación de un ambiente sencillo, en el cual se realizan todos los cálculos orientados a matrices y vectores haciendo el proceso más rápido.

Luego es necesario seguir con la búsqueda de información acerca de los temas más importantes que intervienen en el desarrollo e implementación del proyecto.

- Transformada de Fourier a corto plazo
- Transformada discreta de Fourier
- Implementación mediante transformada rápida
- Tipos de ventaneos
- Síntesis digital de sonidos

Cada uno de estos conceptos se investiga de una forma exhaustiva observando las ecuaciones que los caracterizan, sus cualidades y características más significativas que permiten conocer las generalidades más precisas para su posterior implementación.

Como segundo paso, se investiga acerca de las herramientas que permite manipular MATLAB para leer y guardar archivos de audio, para implementar el algoritmo de la transformada rápida de Fourier y los diferentes tipos de ventana, además se debe observar los parámetros para una implementación correcta.

Se realiza una serie de programas donde se observa las características de la transformada discreta de Fourier y su respectiva implementación mediante el algoritmo de la transformada rápida determinando su utilidad en el momento de realizar el análisis de la señal de audio.

Se implementa en MATLAB los diferentes tipos de ventanas determinando su comportamiento y mediante la investigación que se realizó se escogió el tipo y la longitud de ventana más óptima para el análisis.

Se realiza una investigación acerca de las diferentes alternativas para implementar la síntesis, en esta se observó que la mayoría parten de una señal u oscilación base y una sola permite la manipulación de los archivos de audio, esta permitió que mediante una señal ventana y cambiando sus características más significativas límites y ancho se puedan tomar trozos de la señal y ser sintetizada a partir de estos.

Para que el usuario pueda entender y observar cada una de las características de la señal de audio en tiempo y su análisis en frecuencia y además obtener la señal sintetizada mediante los parámetros de la señal envolvente, se realizó una interfaz gráfica generando un ambiente dinámico y organizado para la simulación de cada una de las partes del proyecto.

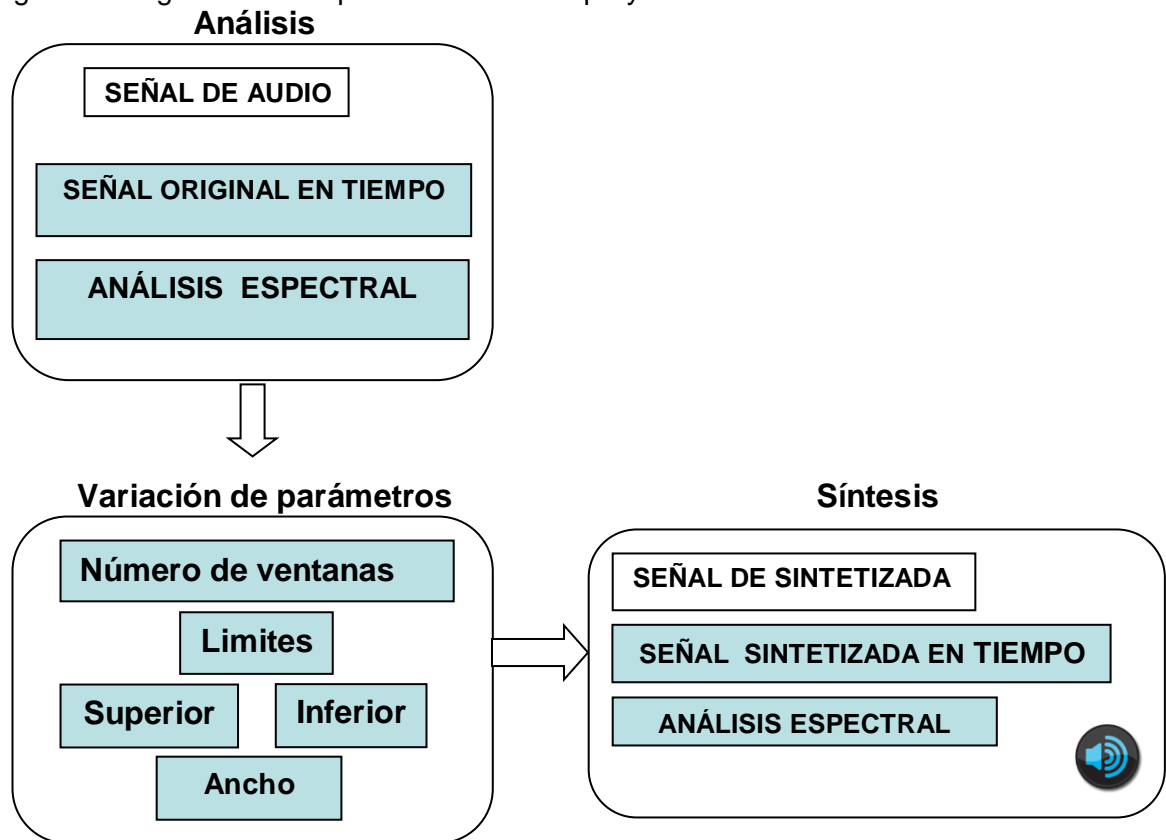
## 6 DESARROLLO

La herramienta está compuesta por dos partes: una de análisis de la señal de audio y la otra la síntesis de la señal.

En la primera parte se realiza el análisis de la señal mediante la transformada corta de Fourier. En esta se toman tramos de la señal y realizar la transformada discreta de Fourier a cada uno, los tramos son tomados mediante la multiplicación con una ventana observándose así el análisis de la señal en frecuencia.

La segunda parte es la síntesis. Allí mediante las características que se le asignen a la ventana envolvente de los cuantos (fragmentos de sonidos cortos) se generan diferentes formas de onda, luego de obtener la nueva señal en tiempo se realiza el análisis de Fourier para observar la señal sintetizada en frecuencia.

Figura 9. Diagrama de bloques desarrollo del proyecto



(Yaya, 2010)

## 6.1 SELECCIÓN DEL SOFTWARE

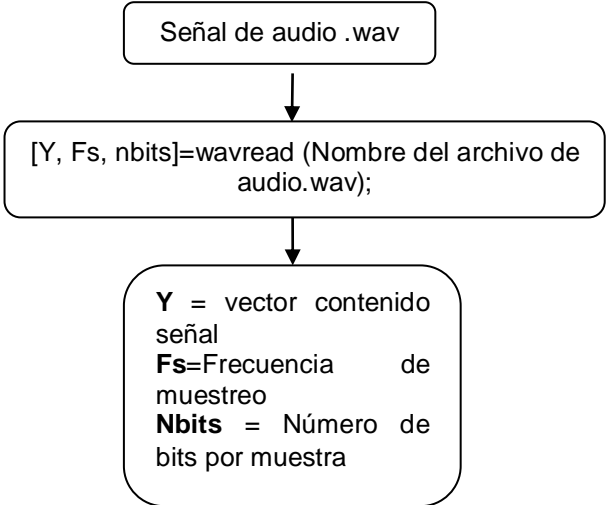
El software que se manejó para la implementación del proyecto fue Matlab 7.7 con licencia académica, es una herramienta que se utiliza dentro del mundo académico, permite al estudiante un total manejo de todas las herramientas proporcionadas por este, además es muy utilizado en el procesamiento digital de señales ya que tiene funciones previamente escritas tales como la transformada rápida de Fourier, implementación de los ventaneos, lectura y escritura de archivos de audio indispensables para el desarrollo del proyecto.

## 6.2 MANIPULACIÓN DE ARCHIVOS DE AUDIO

### 6.2.1 Leer archivos de audio en MATLAB

Para leer y manipular un archivo wav se utiliza la función establecida por MATLAB wavread. El diagrama de flujo se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Proceso de adquisición señal de audio

Descripción	Diagrama de bloques
<p>Con la instrucción wavread se almacena la señal en un vector el cual contiene una secuencia larga de números representando la señal de audio, mediante la instrucción se puede obtener la frecuencia de muestreo Fs y el número de bits por muestra nbits utilizados para codificar los datos en el archivo.</p>	 <pre> graph TD     A[Señal de audio .wav] --&gt; B["[Y, Fs, nbits]=wavread (Nombre del archivo de audio.wav);"]     B --&gt; C["<b>Y</b> = vector contenido señal <b>Fs</b>=Frecuencia de muestreo <b>Nbits</b> = Número de bits por muestra"]         </pre>

Cuando se lee la señal y se quieren obtener características como frecuencia de muestreo y número de bits por muestra se representan de la forma que se muestra en la figura 10.

La frecuencia de muestreo Fs, es el número de muestras por unidad de tiempo que se toman de una señal continua para producir una señal discreta y el número

de bits por muestra (nbits) determina la precisión con la que se reproduce la señal original.

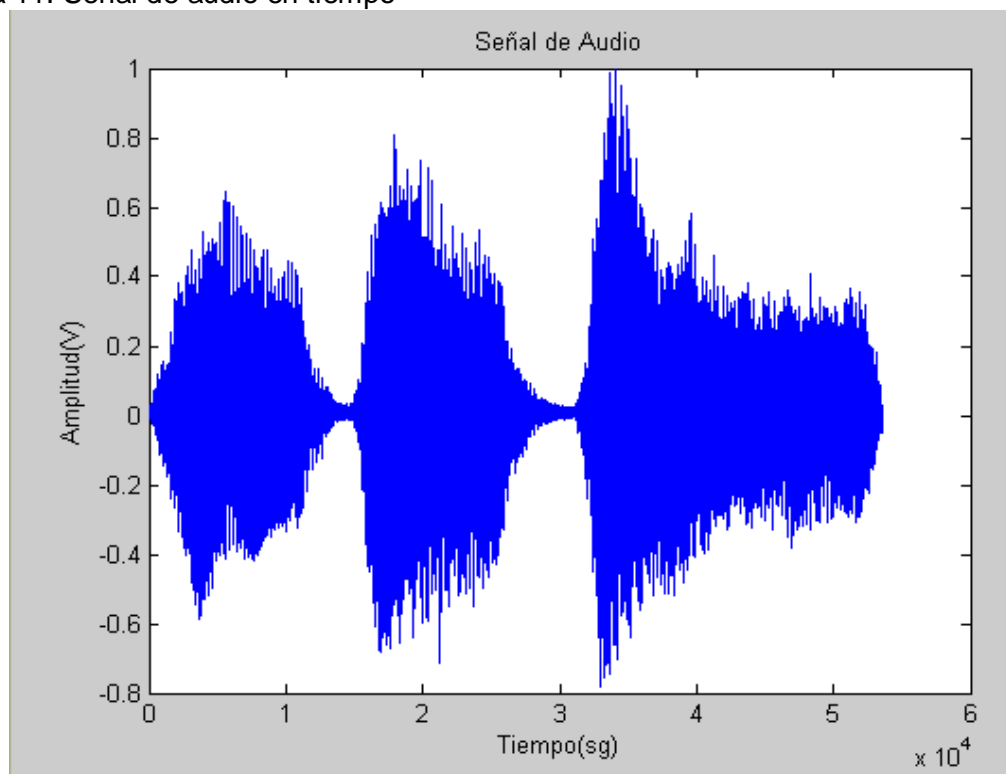
Figura 10. Datos obtenidos de una señal de audio

Fs	44100
nbits	16
y	<91136x1 double>

(MATLAB, R2008A)

Al realizar un gráfico de la señal de audio, se observa la señal representada en tiempo (sg) y amplitud (v), como se observa en la figura 11.

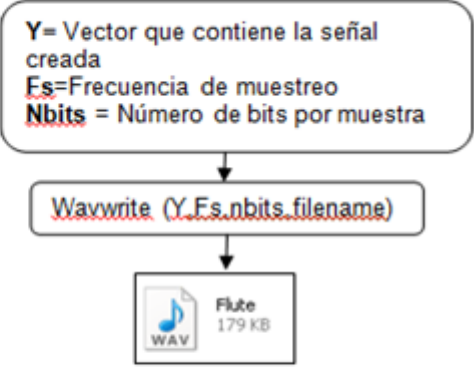
Figura 11. Señal de audio en tiempo



## 6.2.2 Guardar archivos de audio en MATLAB

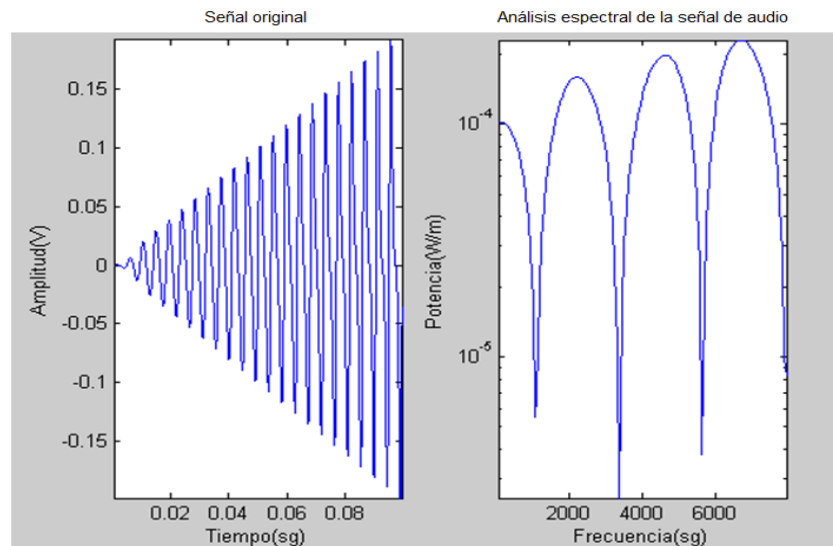
Para guardar el archivo de audio sintetizado se utiliza la función establecida en MATLAB wavwrite. El diagrama de flujo se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Guardar archivos de audio

Descripción	Diagrama de bloques
<p>Con la instrucción <code>wavwrite</code> se guarda la señal en formato <code>wav</code> teniendo en cuenta los siguientes parámetros:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vector que contiene la señal sintetizada.</li> <li>• Frecuencia de muestreo</li> <li>• Número de bits (puede ser 8, 16, 24 o 32)</li> <li>• Nombre del archivo en el cual se grabara el sonido.</li> </ul>	 <pre> graph TD     A["Y= Vector que contiene la señal creada Fs=Frecuencia de muestreo Nbits = Número de bits por muestra"] --&gt; B["Wavwrite (Y.Fs.nbits.filename)"]     B --&gt; C["Flute 179 KB WAV"]   </pre>

### 6.3 ANÁLISIS DE LA SEÑAL ORIGINAL

Figura 12. Señal en el dominio del tiempo y de la frecuencia



Para analizar señales de audio es necesario acudir al dominio del tiempo o al dominio de la frecuencia, en el dominio del tiempo se puede observar la variación de la amplitud con respecto al tiempo, en este se observa una representación natural de la señal siendo difícil determinar sus componentes fundamentales razón

por la cual se debe obtener la señal en el dominio de la frecuencia en la cual se representa la variación de la amplitud en función de la frecuencia apreciándose los componentes de la señal. En la figura 12, se puede observar la señal de audio con su respectivo análisis espectral en MATLAB.

Una de las herramientas matemáticas más importantes para llevar a cabo la transformación de señales del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia es la Transformada de Fourier.

Para el desarrollo del proyecto se realizó el análisis de la señal de audio mediante la transformada corta de Fourier, este proceso consiste en descomponer la señal en una serie de segmentos y analizarlos independientemente. Para realizar la descomposición es necesario establecer la ventana que permita tomar las muestras de la señal para luego aplicar la transformada.

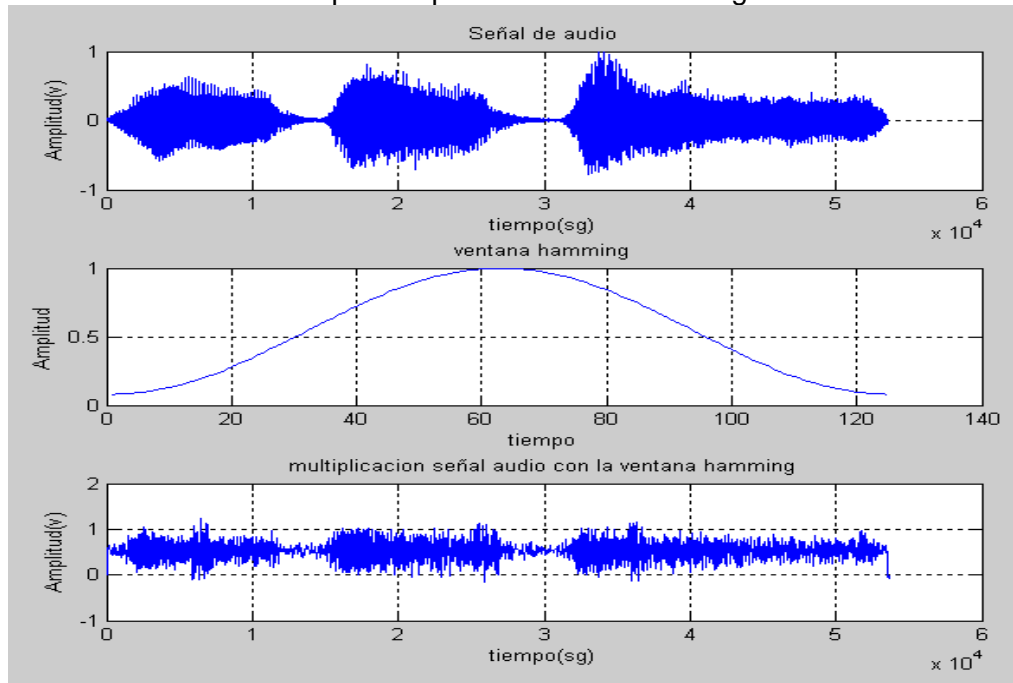
El diagrama de flujo de la transformada corta de Fourier se encuentra en la tabla 4.

Tabla 4. Transformada corta de Fourier

Descripción	Diagrama de bloques
<p>Se tiene la señal original en tiempo y se debe realizar el análisis mediante la transformada corta de Fourier.</p> <p>Para tomar los tramos se multiplica la señal por la ventana, la cual se va desplazando en el tiempo, a cada uno de los trozos se le aplica la transformada de Fourier.</p>	<pre> graph TD     A[Transformada corta de Fourier] --&gt; B[Señal original]     A --&gt; C[Ventana desplazada]     B --&gt; D[Multiplicación]     C --&gt; D     D --&gt; E[Trozo de la señal]     E --&gt; F[Transformada discreta de Fourier]     </pre>

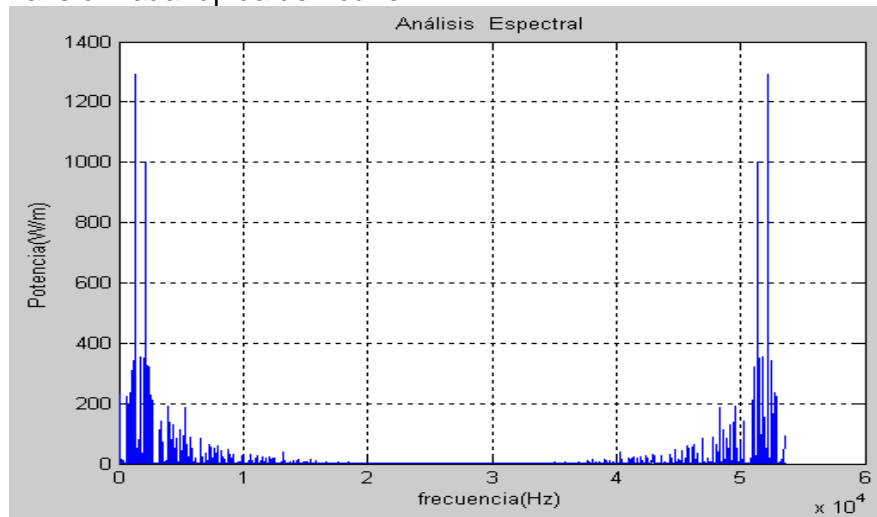
En la Figura 13, se puede observar una señal de audio en tiempo que es multiplicada por una ventana de longitud determinada obteniendo la gráfica final en tiempo.

Figura 13. Señal de audio multiplicada por la ventana hamming



Luego se realiza la transformada rápida de Fourier en donde se puede observar las características en frecuencia de la señal representada en la figura 14.

Figura 14. Transformada rápida de Fourier



### 6.3.1 Características del ventaneo

Para poder identificar la ventana más adecuada para el análisis de la señal de audio es necesario observar las características de cada una de ellas.

Los principales parámetros que caracterizan una ventana temporal son los siguientes (Florez, Cardona, & Jordi, 2009):

- El ancho de banda a 3dB es la diferencia entre las frecuencias en la que al aplicar la ventana hay una atenuación que se mantiene igual o inferior a 3dB comparada con la frecuencia central del pico máximo. (Habilidad que tiene la ventana para separar componentes de igual amplitud).
- Selectividad: indica la habilidad que tiene la ventana para separar componentes diferentes. (el parámetro es el factor de forma que se obtiene de la relación entre el ancho de banda a 60dB y a 3dB).
- Altura del lóbulo lateral principal, determina la resolución en frecuencia.
- Atenuación de los lóbulos laterales evita la distorsión en la forma y envolvente del espectro.
- Magnitud del rizado en la banda de paso, esta define la capacidad de la ventana para representar la magnitud real.

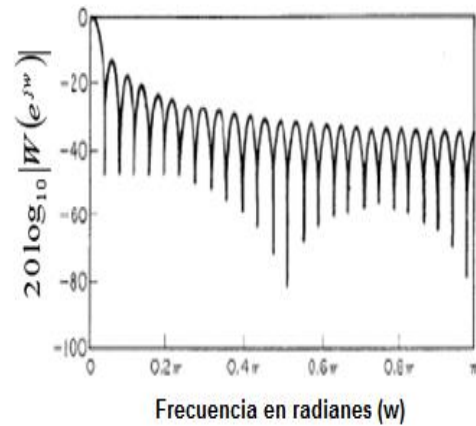
Tabla 5. Características fijas de algunas funciones de las ventanas

Tipo de ventana	Ancho del lóbulo principal $\Delta_{ML}$	Nivel relativo del lóbulo lateral $A_{sl}$	Atenuación mínima de la banda de parada	Transición ancho de banda $\Delta_w$
Rectangular	$4\pi/(2M + 1)$	13.3dB	20.9dB	$0.92\pi / M$
Hanning	$8\pi/(2M + 1)$	31.5dB	43.9dB	$3.11\pi / M$
Hamming	$8\pi/(2M + 1)$	42.7dB	54.5dB	$3.32\pi / M$
Blackman	$12\pi/(2M + 1)$	58.1dB	75.3dB	$5.56\pi / M$

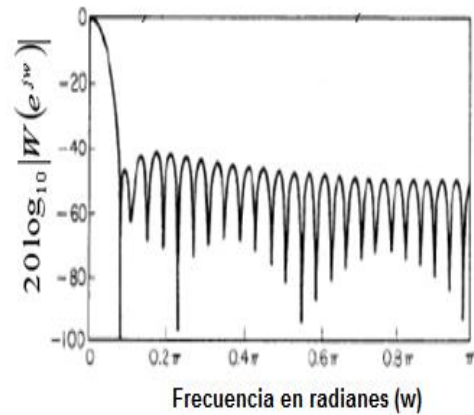
(Mitra, 1998)

En las gráficas que se mostrarán a continuación se observa cada una de las características de los lóbulos de las ventanas, lo que define en gran medida la utilidad de ellas.

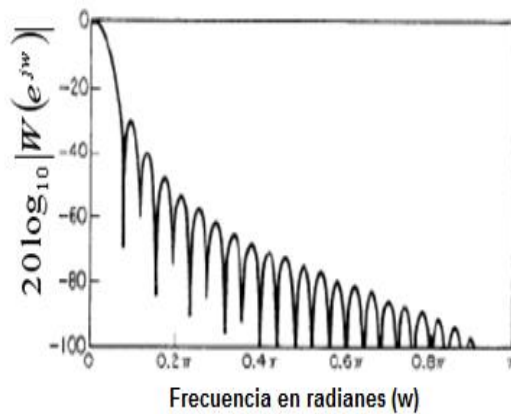
Figura 15. a) Lóbulo ventana Rectangular b) Lóbulo ventana Hamming c) Lóbulo ventana Hanning d) Lóbulo ventana Blackman



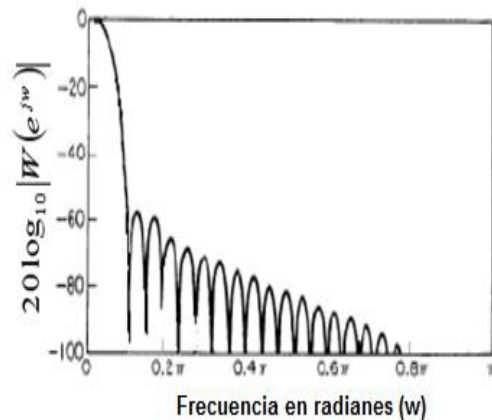
(a)



(b)



(c)



(d)

(Gené, 2006)

Se puede decir que la mayoría de las ventanas permiten realizar un análisis de las señales de audio pero por ejemplo en la práctica la ventana rectangular introduce algunos errores en los componentes en frecuencia, la ventana Blackman posee buena resolución en frecuencia pero no muy buena en amplitud comúnmente es utilizada para medir distorsiones, las que tienen mayor utilidad en este campo son la Hamming y la Hanning, la Hamming posee una buena resolución en frecuencia como en amplitud y la Hanning trata de suavizar los efectos en los bordes de la señal (Begoña, 2009).

En la tabla 6, se puede observar el diagrama de flujo de la representación de los ventaneos implementada en MATLAB.

Tabla 6. Tipos de ventana

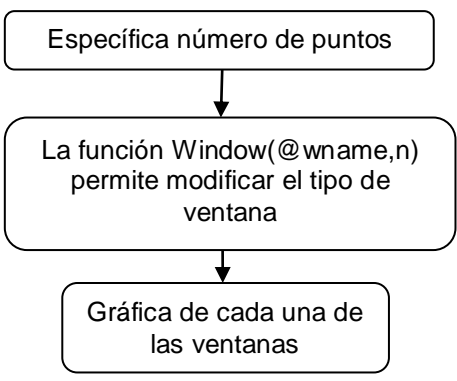
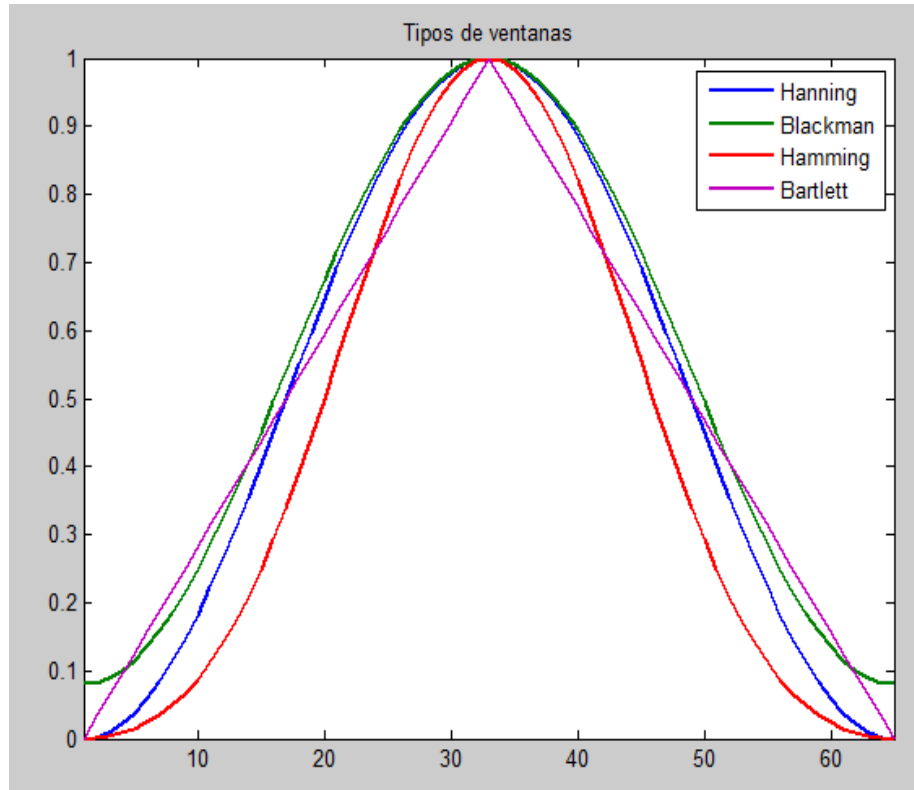
Descripción	Diagrama de bloques
<p>Es un ejemplo que se realiza en MATLAB para observar la representación de cada una de las ventanas.</p>	 <pre> graph TD     A[Especifica número de puntos] --&gt; B[La función Window(@wname,n) permite modificar el tipo de ventana]     B --&gt; C[Gráfica de cada una de las ventanas]             </pre>


Figura 16. Formas de las diferentes ventanas



### 6.3.1.1 Ventaneos en MATLAB

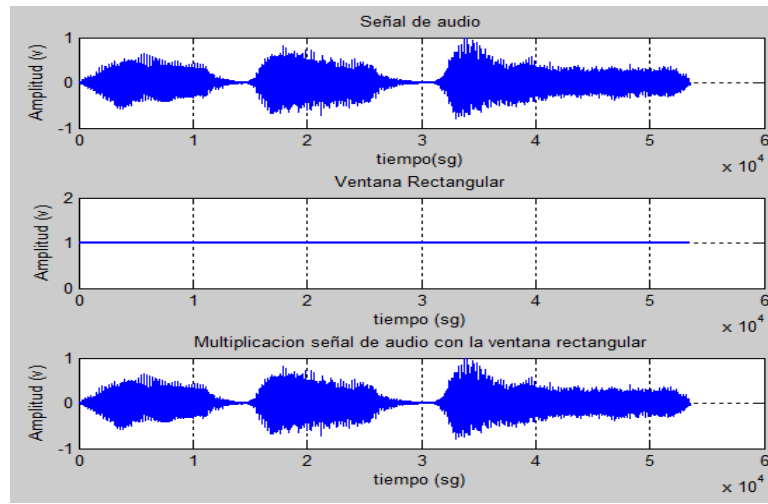
En MATLAB se encuentran preestablecidas cada una de las ventanas, haciendo más preciso el cálculo matemático de cada una de ellas igualmente se puede manipular la longitud a implementar.

Tabla 7. Ventaneos en Matlab

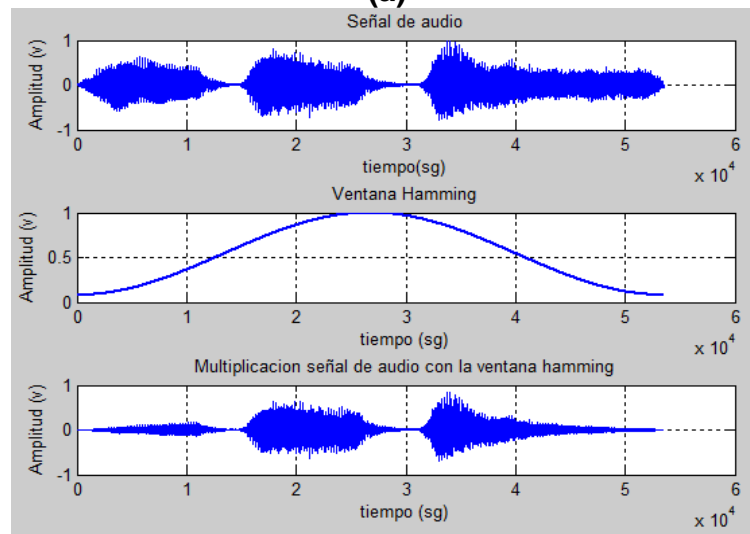
Descripción	Diagrama de bloques
<p>A través de una instrucción se lee el archivo de audio, luego se le aplica el tipo y la longitud de la ventana deseada (Rectangular, Hamming, Hanning, Bartlett, Blackman y kaiser), esta se multiplica con el archivo de audio, observándose los cambios que tuvo la señal original.</p>	 <pre> graph TD     A[Leer el archivo de audio y ponerlo en una variable] --&gt; B[Se escoge la ventana deseada]     B --&gt; C[Se aplica el ventaneo a la longitud de la señal de audio]     C --&gt; D[Multiplicar el archivo de audio y el ventaneo de la señal]     D --&gt; E[Se gráfica la señal de audio, el ventaneo y el resultado de la multiplicación]     </pre>

En las gráficas de la figura 17, se puede observar los diferentes tipos de ventanas y la señal que se obtiene al ser multiplicado el archivo de audio entre la ventana, en algunos de los ejemplos la señal es suavizada significativamente quitando los bordes externos de la señal y algunos picos en amplitud, sin modificar con esto el sonido de la señal de audio, la ventana permite tomar trozos de la señal teniendo en cuenta la longitud que se le asigna para luego mediante la transformada discreta de Fourier obtener la representación en frecuencia en cada trozo.

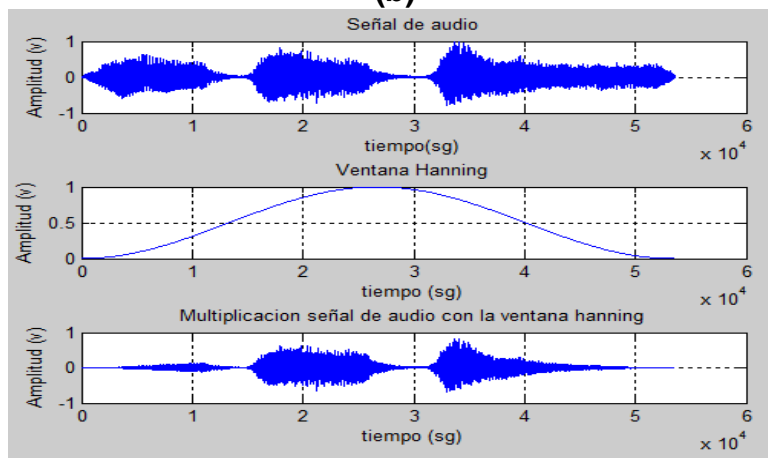
Figura 17. a) Ventana Rectangular b) Ventana Hamming c) Ventana Hanning d) Ventana Blackman



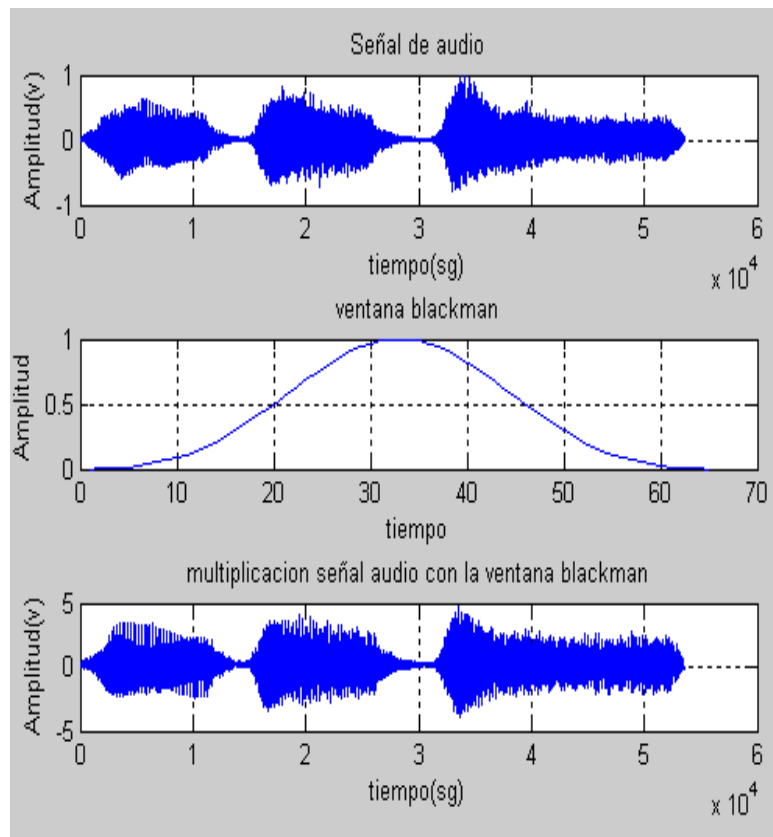
(a)



(b)



(c)



(d)

### 6.3.2 Transformada discreta de Fourier

La transformada de Fourier permite descomponer la señal en frecuencias, la función definida en el tiempo  $f(t)$  es transformada al dominio de la frecuencia  $F(\omega)$  siendo esta la transformada de Fourier. Se especificó que es posible expresar las señales como la suma de senos y cosenos con diferentes frecuencias y amplitudes para establecer la función original (Cortés, et al., 2007).

Al usar la transformada de Fourier se realiza la solución de integrales de forma continua para todo el tiempo. En la práctica, no es muy adecuado utilizarla ya que es posible necesitar gran consumo de tiempo además del desconocimiento de la señal original porque en la captura se obtienen datos discretos, una solución para esto utilizada en aplicaciones de ingeniería y tratamiento de señales, es realizar el proceso de forma discreta de la transformada de Fourier (Cortés, et al., 2007).

En los procesos de adquisición de datos el análisis no se realiza en forma continua sino que se llevan a cabo mediante técnicas digitales donde es necesario realizar un muestreo en intervalos de tiempo, por esto, es preciso aplicar la transformada

de Fourier a la señal discreta y realizar el análisis espectral pero mediante la transformada discreta de Fourier (Cortés, et al., 2007).

La transformada discreta está definida de la siguiente manera:

Ecuación 17. Transformada discreta de Fourier DFT

$$x[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]e^{(-j2\pi(k)(n)/N)}$$

(Cortés, et al., 2007)

Para calcular la DFT se requiere la suma compleja de N multiplicaciones complejas para cada una de las salidas, en total  $N^2$  multiplicaciones complejas y  $N(N-1)$  sumas complejas para realizar un DFT de N puntos.

Se realizó un ejemplo donde se puede observar la implementación de la DFT (Transformada discreta de Fourier) matemáticamente con  $x[n] = \{2,1,3\}$ :

Ecuación 18. Ejemplo cálculo matemático de DFT

$$k = 0; X_t[0] = \sum_{n=0}^{3-1} X[n]e^{(-j2\pi(0)n/4)} = 2e^{(-j2\pi(0)(0)/4)} + 1e^{(-j2\pi(0)(1)/4)} + 3e^{(-j2\pi(0)(2)/4)} = 6$$

$$k = 1; X_t[1] = \sum_{n=0}^{3-1} X[n]e^{(-j2\pi(1)n/4)} = 2e^{(-j2\pi(1)(0)/4)} + 1e^{(-j2\pi(1)(1)/4)} + 3e^{(-j2\pi(1)(2)/4)} = 1.73j$$

$$k = 2; X_t[2] = \sum_{n=0}^{3-1} X[n]e^{(-j2\pi(2)n/4)} = 2e^{(-j2\pi(2)(0)/4)} + 1e^{(-j2\pi(2)(1)/4)} + 3e^{(-j2\pi(2)(2)/4)} = -1.73j$$

Por lo tanto la transformada discreta de Fourier de los valores representados en  $X[n]$  es  $X_t[k] = \{6, 1.73j, -1.73j\}$  para  $k=0, 1, 2$ .

En la tabla 8, se observa el diagrama de flujo de la implementación de la transformada discreta de Fourier en MATLAB realizando el cálculo matemático anteriormente expuesto se pudo comprobar que los resultados que se obtienen matemáticamente y con la función realizada en MATLAB son los mismos, lo que quiere decir que se puede representar la transformada discreta de Fourier matemáticamente y de forma computacional.

Se puede notar que el número de operaciones que se deben realizar en la transformada discreta de Fourier demandan mucho tiempo y recursos del sistema,

por eso, en 1965 Cooley y Tukey desarrollaron un nuevo algoritmo que reduce en gran medida el número de operaciones, la transformada rápida de Fourier se utiliza para implementar la transformada discreta de Fourier (DFT) de forma rápida y eficiente, ya que para realizar la DFT se requieren ( $N^2$ ) operaciones aritméticas y en el algoritmo de la transformada rápida de Fourier (FFT) se obtiene el mismo resultado con solo ( $N * \log_2 N$ ) simplificando así las operaciones y haciendo más eficiente el proceso. (Begoña, 2009)

Tabla 8. Ejemplo de la DFT en MATLAB

Descripción	Diagrama de bloques
<p>Se crea una función en MATLAB donde se van a introducir los parámetros a evaluar, luego se guarda en una variable el tamaño del vector y se inicializa la DFT, se crean las variables necesarias para desarrollar la ecuación DFT, esto se guarda en un vector que permite obtener el resultado de las operaciones que se hacen para representar la transformada discreta de Fourier.</p>	<pre> graph TD     A[Se crea una función en Matlab donde se podrán cambiar los valores de los parámetros X[n]] --&gt; B[Número de elementos de X[n]]     B --&gt; C[Inicializa DFT]     C --&gt; D[Crear variable para realizar la ecuación DFT Teniendo en cuenta el valor de k, n, N]     D --&gt; E[Resultado de la DFT]     </pre>

La transformada rápida de Fourier FFT consiste en descomponer  $X[n]$  en un conjunto de procesos con menor número de elementos, una vez que se realiza la descomposición se calcula la DFT a cada subconjunto y se obtiene la transformada de la señal original.

Se realizó nuevamente la implementación en MATLAB de la transformada discreta de Fourier pero mediante el algoritmo de la transformada rápida de Fourier, se comprobó que utilizando los tres cálculos, tanto el matemático, como el de la transformada discreta y la implementación del algoritmo FFT se obtienen los mismos resultados, lo que confirma que la transformada rápida implementada en MATLAB nos permite obtener buenos resultados en el desarrollo del proyecto ya que al utilizarse en archivos de audio que posee número de datos significativo se obtiene una buena representación en frecuencia.

Tabla 9. Transformada discreta de Fourier con el algoritmo FFT en MATLAB

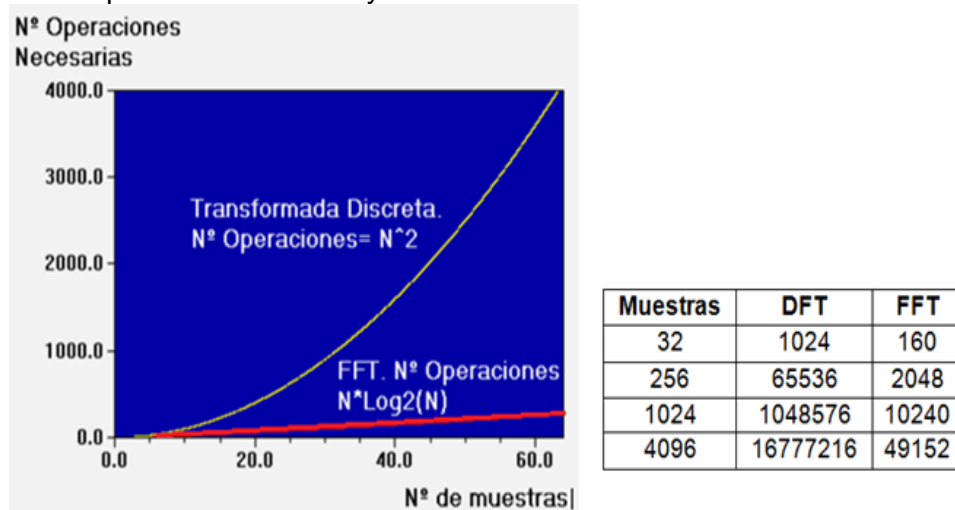
Descripción	Diagrama de bloques
<p>Se crea una función en MATLAB donde se van a introducir los parámetros, luego se halla la longitud del vector asignándole una variable, se crea una variable que contiene los números complejos que se van a obtener, luego se hace una división recursiva en donde se aplica la transformada rápida de Fourier y luego se realiza una matriz de Fourier que guarda los resultados obtenidos en esta.</p>	<pre> graph TD     A[Se crea una función en MATLAB donde se podrán cambiar los valores de los parámetros.] --&gt; B[Se halla la longitud del vector X]     B --&gt; C[Se crea una variable que contiene números complejos]     C --&gt; D[Se realiza una división recursiva en donde se aplica el algoritmo FFT]     D --&gt; E[Matriz de Fourier]         </pre>

En la figura 18, se observa la comparación de la transformada discreta de Fourier y el algoritmo de la transformada rápida, en donde si el número de operaciones aumenta la DFT crece exponencialmente y el algoritmo FFT se mantiene lineal.

MATLAB tiene preestablecida la función `fft(x)`, está calcula los R puntos de un vector en DFT, siendo R la longitud del vector. Para el cálculo de la DFT de una

longitud N, la función que se utiliza es  $\text{fft}(x,N)$ . En este caso, si  $R > N$ , este es truncado en las primeras N muestras, mientras que si  $R < N$ , el vector x es completado con ceros al final para que se convierta en una longitud de N secuencias (Mathworks, 1994).

Figura 18. Comparación entre DFT y FFT



(Borjas & Quispe, 1999)

Tabla 10. Funciones preestablecidas en MATLAB

$X = \text{fft}(x)$	Hacer la fft del vector x, "X" es un vector de números complejos ordenados desde $k=0 \dots N-1$ .
$X = \text{fft}(x,N)$	Si la longitud de x es menor que N, el vector se rellena con ceros. Si es mayor, el vector es truncado.
$X = \text{ifft}(x)$ $X = \text{ifft}(x,N)$	Hace la FFT inversa del vector x. Se puede especificar el número de puntos N con el que quiero hacer ifft
$X = \text{fftshift}(x)$	Reordena el vector X en orden creciente de frecuencia

(Mathworks, 1994)

Igual como en la transformada de Fourier, la transformada rápida nos permite pasar del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, representación que permite realizar el análisis de la señal de audio.

En la tabla 11, se puede observar un ejemplo utilizando la transformada rápida de Fourier implementada en MATLAB, en donde se determina la DFT en una secuencia de puntos mediante el algoritmo FFT, este ejemplo se realiza con el fin de conocer las características de la transformada de Fourier y utilizarla de manera adecuada en la implementación del proyecto.

Tabla 11. Implementación en MATLAB de la FFT

Descripción	Diagrama de bloques
<p>Se van a determinar los M puntos para DFT de la siguiente secuencia de N-puntos.</p> $u[n] \begin{cases} 1, & 0 \leq n \leq N - 1 \\ 0, & \text{paratodo} \end{cases}$ <p>En el programa se solicitan los datos de entrada N y M. Para garantizar la correcta implementación de DFT (Mediante el algoritmo FFT) el valor de M debe ser superior o igual a N (<math>M \geq N</math>). Después de que se introducen estas variables se calcula el punto M de DFT y se grafica la secuencia original de N puntos, la magnitud y la fase de DFT.</p>	<pre> graph TD     A[Introduce el valor de la longitud de la secuencia N y la longitud M deseada de la DFT] --&gt; B[Genera la longitud N de la secuencia en el dominio del tiempo]     B --&gt; C[Calcula los M puntos de DFT con el algoritmo FFT]     C --&gt; D[Gráfica en el dominio del tiempo de la secuencia DFT]     D --&gt; E[Gráfica de la magnitud de las muestras DFT]     E --&gt; F[Gráfica de la fase de las muestras DFT]     </pre>

En la figura 19 y 20, se puede observar la secuencia original de N puntos y la magnitud y la fase de la transformada discreta de Fourier implementada mediante el algoritmo de la transformada rápida de Fourier.

Figura 19. Secuencia original DFT en el dominio del tiempo

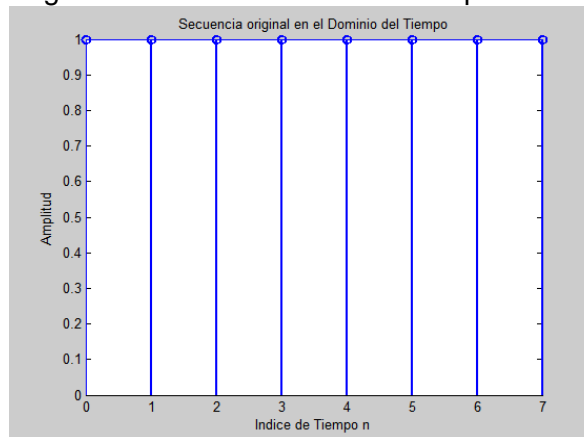
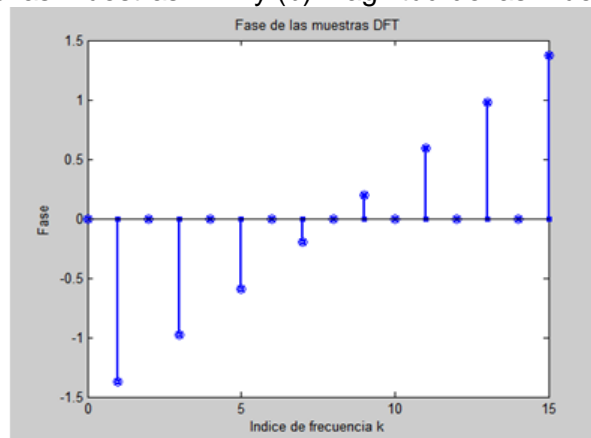
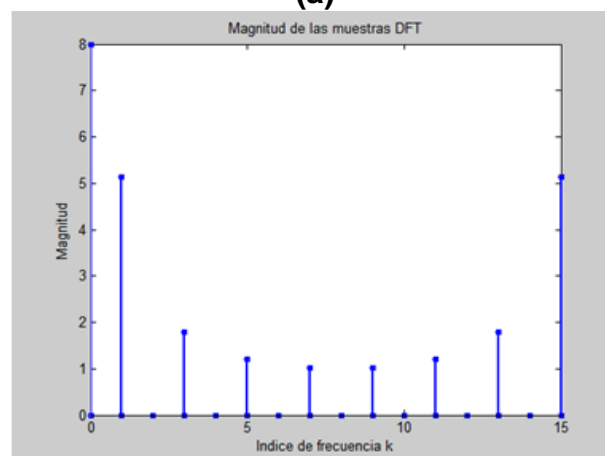


Figura 20. (a) Fase de las muestras DFT y (b) Magnitud de las muestras DFT



(a)



(b)

### 6.3.3 Explicación del análisis de la señal de audio en MATLAB

Tabla 12. Implementación en MATLAB del análisis de la señal

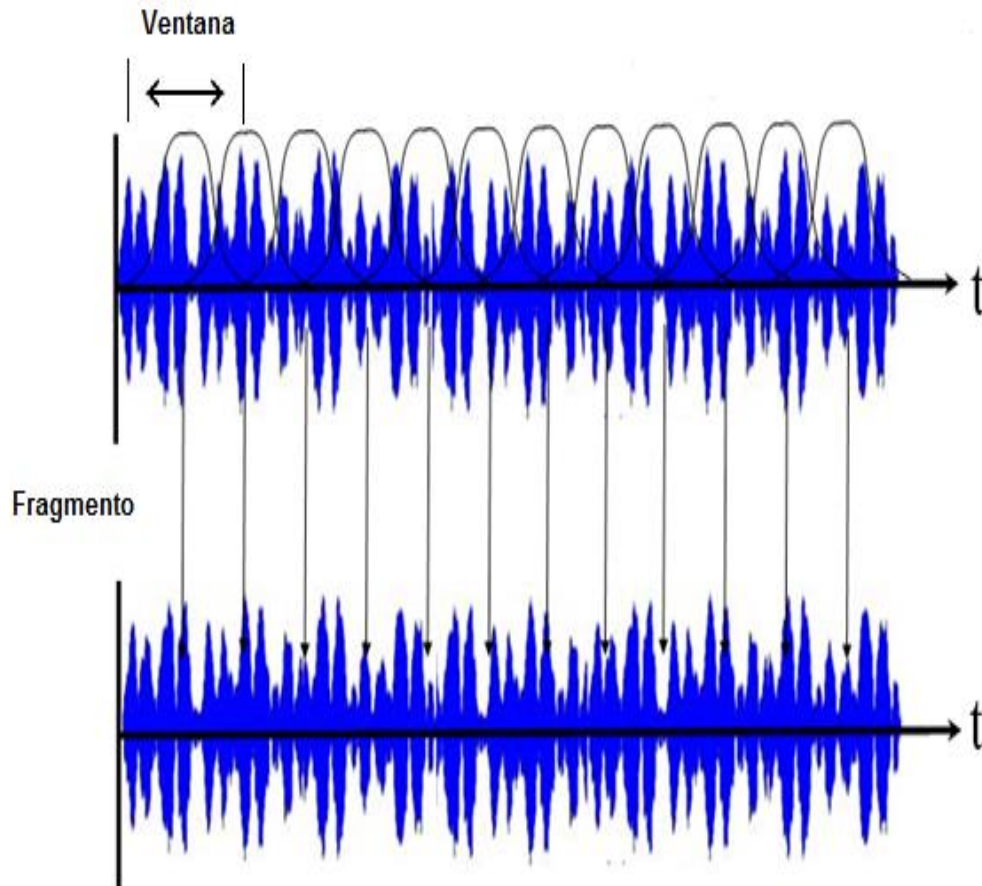
Descripción	Diagrama de bloques
<p>Programa en Matlab que realiza el análisis de la señal de audio.</p> <p>Se lee el archivo de audio asignándolo a una variable, donde quedarán guardados los valores que representan la señal, también es preciso determinar la <math>F_s</math> (frecuencia de muestreo) esencial para manipular la señal, luego se asigna una variable al rango de tiempo y se toman ciertos valores en un rango determinado para graficar la señal en tiempo.</p> <p>Para realizar el análisis es preciso asignar el número de puntos a analizar, luego se hace la transformada corta de Fourier, aplicándole el ventaneo y la transformada rápida a cada segmento respectivamente, enseguida se calcula la potencia para la frecuencia seleccionada y se dibuja el espectro en frecuencia de la señal.</p>	<pre> graph TD     A[Señal de audio wav] --&gt; B["[Y, Fs]=wavread (Nombre del archivo de audio.wav)"]     B --&gt; C[Vector tiempo]     C --&gt; D["Cota para vector de tiempo en señal original"]     D --&gt; E["Dibujar señal original en división de tiempo"]     E --&gt; F["Número de puntos a analizar"]     F --&gt; G["Calculo de la transformada corta de Fourier"]     G --&gt; H["Calcula potencia para la frecuencia seleccionada"]     H --&gt; I["Frecuencia correspondiente a amplitud"]     I --&gt; J["Dibuja espectro en frecuencia"]     </pre>

## 6.4 SÍNTESIS DE LA SEÑAL DE AUDIO

La síntesis de la señal de audio se hizo en base a las síntesis granular, está es una técnica utilizada en producción musical, en la cual se toman pequeños fragmentos de la señal mediante una envolvente y luego mediante los fragmentos que se tomaron se obtiene una nueva forma de onda.

En este caso la señal envolvente es una ventana Hamming, ya utilizada en el análisis de la señal, al ir variando el número de ventanas, sus límites superior e inferior y el ancho respectivamente se modifican las características de la señal en el intervalo de tiempo que va desde que se termina un grano hasta que comienza uno nuevo realizando así la síntesis de la señal de audio, adicional a esto parámetros como la frecuencia y la amplitud también varían.

Figura 21. Señal de audio sintetizada mediante granos



(Cádiz, 2008a)

### 6.4.1 Función granular en MATLAB

En la tabla 13 se puede observar una descripción de los programas elaborados en MATLAB para la síntesis de tonos utilizando granos (fragmentos cortos de sonidos), en este se permite cambiar las características de la señal envolvente para poder extraer los fragmentos que tendrán el objetivo de reconstruir una nueva señal a partir de la señal original de audio.

Tabla 13. Función generar granos

Descripción	Diagrama de bloques
<p>Se crea una función en MATLAB que tiene como parámetros: la señal de audio original, una variable que contiene el segmento, la longitud del segmento y el ancho del segmento, aquí se extrae el fragmento teniendo en cuenta las características anteriormente nombradas. Luego se aplica la ventana Hamming teniendo en cuenta el ancho del segmento, y por último se define el límite inferior y superior de la ventana.</p>	<pre>graph TD; A[Se crea una función para los granos] --&gt; B[Si el tamaño de la ventana es muy pequeño se produce un error]; B --&gt; C[Extrae el segmento]; C --&gt; D[Se aplica la función ventana Hamming]; D --&gt; E[Se define el límite inferior de la ventana]; E --&gt; F[Se define el límite superior de la ventana];</pre>

## 6.4.2 Explicación de la señal sintetizada en MATLAB

Tabla 14. Descripción señal sintetizada

Descripción	Diagrama de bloques
<p>En la interfaz gráfica se ponen los parámetros número de ventanas, límite superior e inferior y ancho respectivamente, estos son fundamentales para realizar la definición de inicio y final del grano, permitiendo obtener el vector de granulación que contiene la señal sintetizada.</p> <p>Se crean unas constantes donde se manipulan los parámetros de entrada, luego se define la ventana respecto al límite superior e inferior y al número de ventanas, se define un vector de inicio de grano teniendo en cuenta la longitud de la señal original, el límite máximo y el número de ventanas, y luego se define un vector con el final del grano. Luego se crea un vector que contiene las amplitudes del grano y otro que contiene un vector de ventanas donde se hace el corrimiento de estas o el solape respecto a una variable que contiene la definición de la ventana. Para hacer la síntesis se llama la función grain que contiene las características del segmento y por último se obtiene el vector que contiene la señal sintetizada</p>	<pre> graph TD     A[En la interfaz gráfica para reconstruir la señal mediante los granos y la envolvente] --&gt; B[Insertar parámetros Numero de ventana Límite superior Límite inferior Ancho ventana]     B --&gt; C[Creación de coeficientes asignándole los parámetros]     C --&gt; D[Define el vector ventanas]     D --&gt; E[Define vector de inicio de grano]     E --&gt; F[Define vector de final de grano]     F --&gt; G[Se llama la función grain para obtener segmento]     G --&gt; H[Se obtiene el vector que contiene la granulación obtenida respecto a la señal original]     H --&gt; I[Se realiza el análisis de la señal sintetizada y se guarda con wavwrite]     </pre>

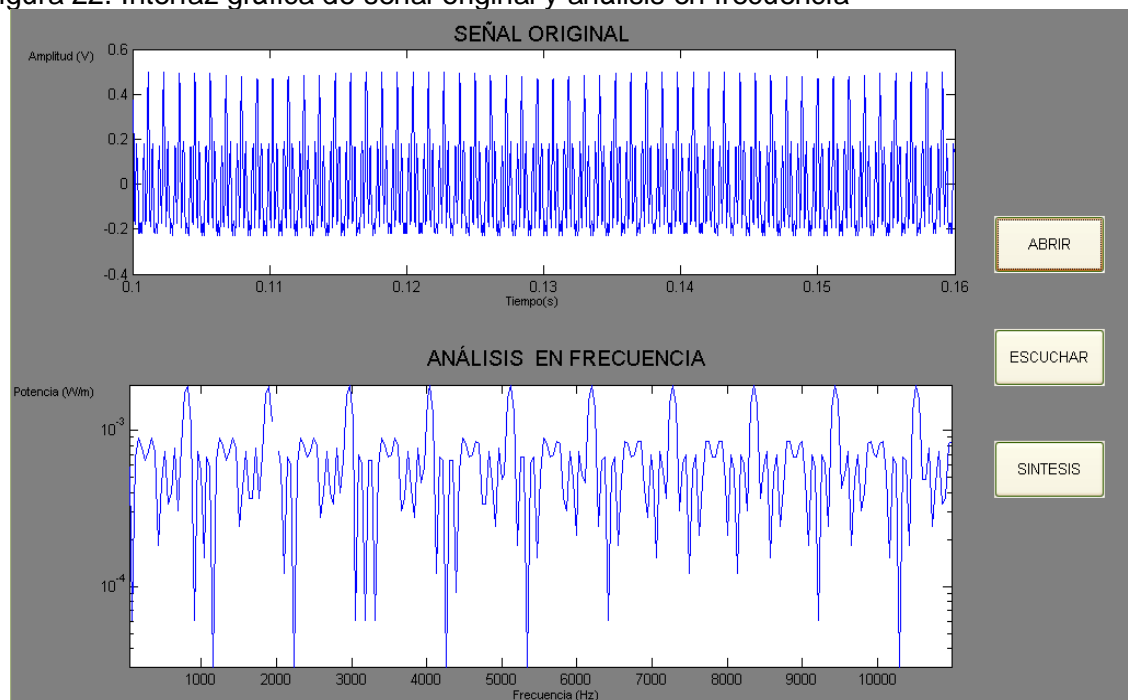
## 6.5 INTERFAZ GRÁFICA DE ANÁLISIS Y SÍNTESIS DE LA SEÑAL

La interfaz gráfica se implementó con el objetivo de poder sintetizar la señal de audio mediante las características de la ventana, ya que mediante esta envolvente y teniendo en cuenta los cuantos (granos) que se extraen de la señal original se pueden observar y escuchar los cambios que se presentaron en la señal de audio tanto en frecuencia como en amplitud, además se pueden manipular los programas que ya se habían implementado mediante la interfaz.

Lo primero que se hace es una presentación del proyecto que posee un pequeño manual práctico.

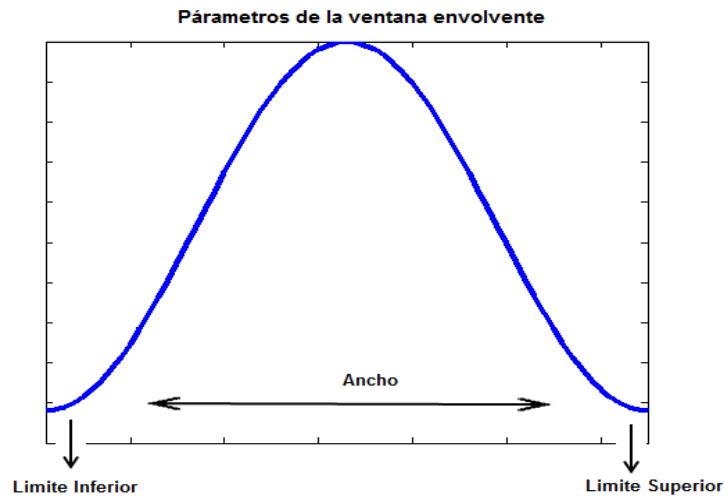
En la siguiente interfaz, se le permite al usuario abrir un archivo de audio el cual puede ser seleccionado, luego se observan las gráficas de la señal original y su análisis en frecuencia, otra de las opciones es poder escuchar el sonido.

Figura 22. Interfaz gráfica de señal original y análisis en frecuencia



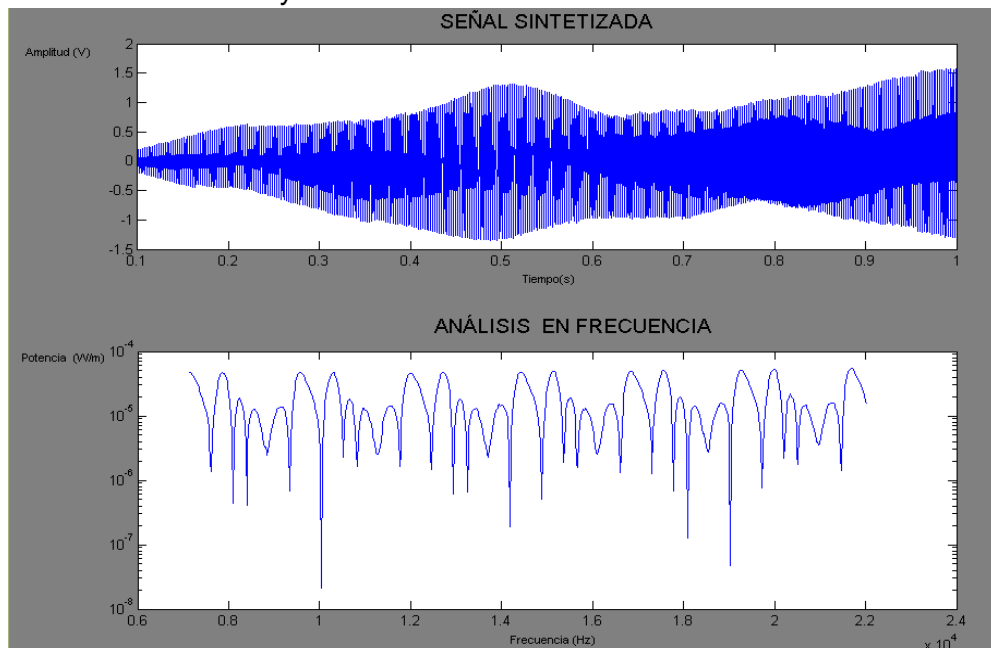
Al escoger el botón síntesis se abre otra interfaz en donde se cambian los valores de la ventana o envolvente de los fragmentos, según cada uno de estos valores se modificarán las características de la señal original. Se pueden variar valores como número de ventanas, límite superior e inferior y el ancho.

Figura 23. Parámetros de la ventana envolvente



Al colocar continuar sale una ventana con dos gráficas que permiten observar los cambios que tuvo la señal en tiempo y en el análisis en frecuencia, igualmente se tiene la opción de escuchar el tono sintetizado o poderlo guardar para ir almacenando en el banco de tonos.

Figura 24. Señal sintetizada y análisis en frecuencia



Otra de las opciones le permite al usuario observar la comparación de las dos señales la original y la sintetizada, en donde se ven las diferencias tanto gráficamente como en su sonido, entregando así al usuario una herramienta dinámica con un entorno estructurado y organizado.

## **7 PRUEBAS Y RESULTADOS**

Las pruebas se realizaron mediante la interfaz gráfica que se implementó para el proyecto, esta permite observar la simulación de la señal original y la sintetizada en tiempo y su análisis en frecuencia, al realizar cambios en la ventana se varían las características de la señal original como son la frecuencia y amplitud.

### **7.1 PRUEBA SOBRE LA SEÑAL DE AUDIO**

Los archivos de audio que permiten realizar el análisis y síntesis son los que tienen una duración de uno a cinco segundos, ya que si son de mayor duración la capacidad de procesamiento del sistema no permite observar el análisis en frecuencia de la señal y no se puede realizar la síntesis, también es muy importante que se trabajen con señales en formato wav y que la información sea codificada en formato PCM, en caso contrario se genera un error en la información de codificación del archivo y no abrirá.

Es importante tener en cuenta las siguientes características para que el sistema funcione correctamente, el límite superior siempre debe ser mayor que el límite inferior tienen un rango de 0.1 a 0.9 que permite definir la ventana en los rangos que decida el usuario y el ancho debe estar entre 0.1 a 0.8, lo más adecuado es que se escoja un valor intermedio entre los límites inferior y superior creando así la forma de la envolvente que se va mover en el tiempo y va ir extrayendo los fragmentos. El número de ventanas debe mantenerse dentro del rango de 25 a 200, en este rango las señales se sintetizan adecuadamente y permite realizar el análisis en frecuencia a la señal sintetizada.

### **7.2 PRUEBA DE UNA SEÑAL DE AUDIO DE UNA FLAUTA**

#### **7.2.1 Objetivo de la prueba**

Esta prueba se realiza con el fin de observar las características de la señal original en tiempo y su análisis en frecuencia y los cambios que le ocurren a la señal cuando se hace la síntesis.

#### **7.2.2 Herramientas**

Se utiliza el software MATLAB, un archivo de audio de una nota de flauta en formato wav que se obtuvo de una página de tonos en internet, con una duración de dos segundos.

### 7.2.3 Procedimiento

Lo primero es adquirir la señal de audio de la flauta que se va a sintetizar, Se van a probar con diferentes parámetros de la ventana envolvente y se observará que pasa con las señales sintetizadas.

Se abre en la interfaz el archivo de audio y se observa la señal en tiempo y su análisis en frecuencia, Al poner el botón sintetizar se abre una ventana donde se modifican los parámetros de la envolvente de los fragmentos de sonido y luego se obtiene la señal sintetizada, allí nuevamente se observa la señal en tiempo y frecuencia, al poner el botón comparar se pueden observar las gráficas de la señal original y sintetizada.

### 7.2.4 Resultados esperados

Se espera que la señal sintetizada tenga cambios tanto en su simulación en tiempo y su análisis en frecuencia, como en el sonido que se produce, en donde se pueda observar el cambio de tonalidad del sonido.

### 7.2.5 Resultados obtenidos

Al abrir el archivo de audio se gráfica automáticamente la señal en tiempo y el análisis en frecuencia.

Figura 25. Señal original

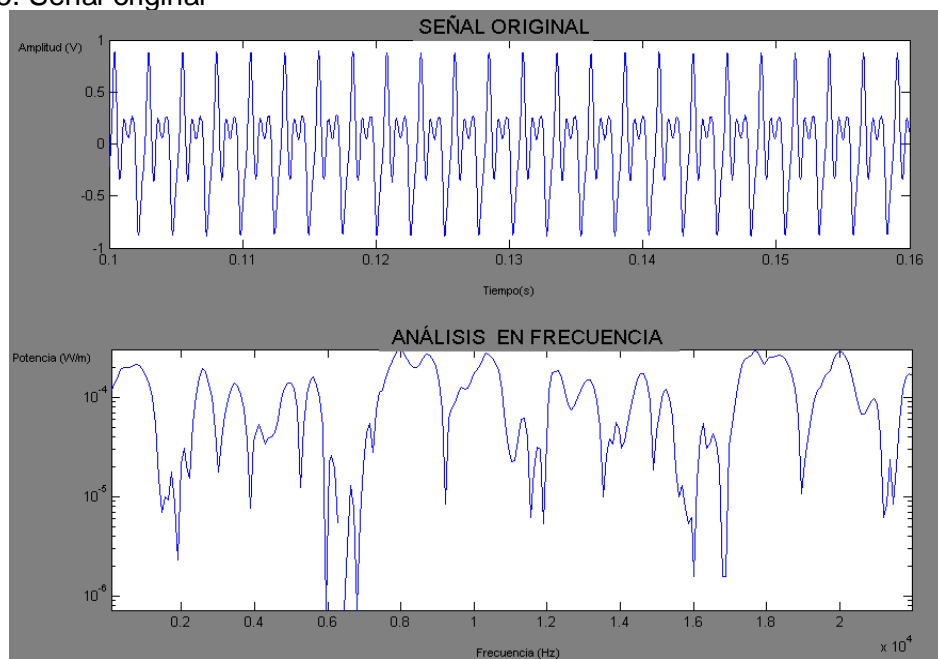


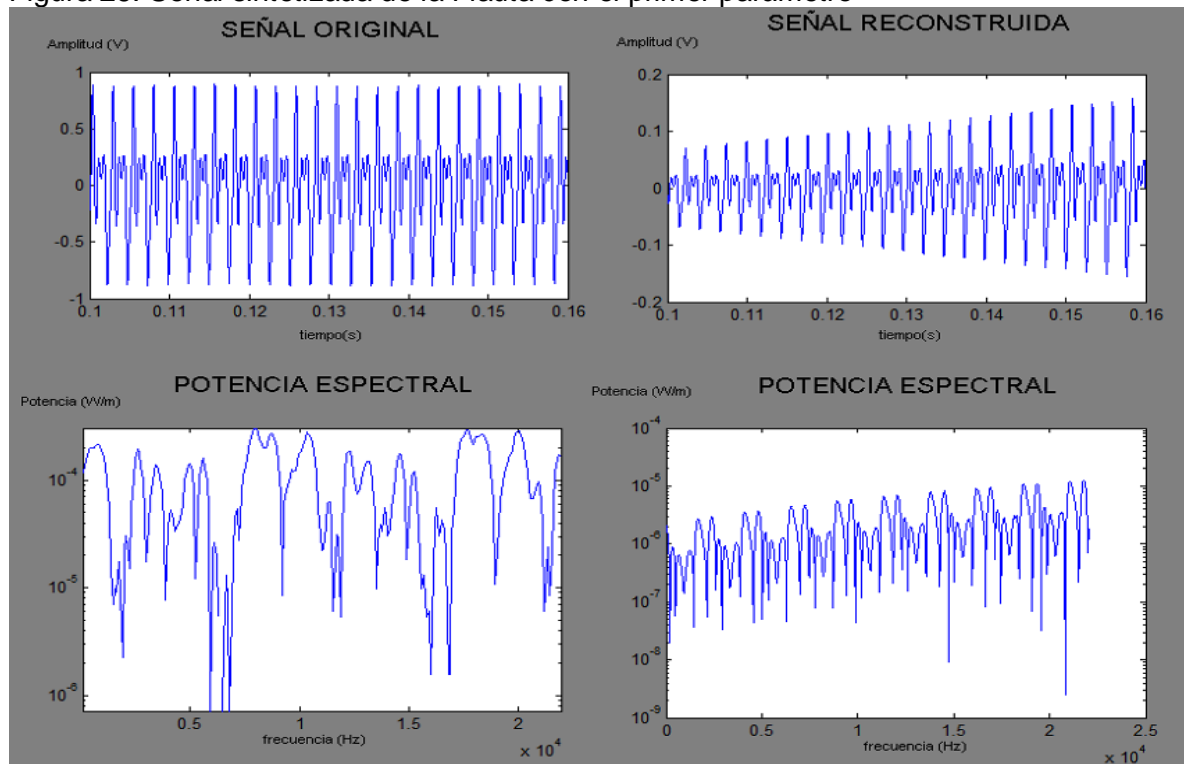
Tabla 15. Parámetros que se variaron en la señal de audio de la Flauta

Número de ventanas	Altura Máxima	Altura Mínima	Ancho	Descripción sonido
20	0.6	0.5	0.3	Se escucha un sonido suave y es como si se repitiera progresivamente.
60	0.9	0.6	0.4	Se escucha un sonido más agudo y se unen dos tonos.
200	0.3	0.2	0.1	Cambia el tono completamente es la secuencia de un tono grave pero con diferente frecuencia.

### 7.1.1 Resultados obtenidos

Respecto a la señal original los picos que ella posee en la señal sintetizada de la Figura 26, son más pequeños y van aumentando progresivamente, en la señal original se mantienen constantes, en el análisis espectral de la señal sintetizada el espectro se observa con mayor definición.

Figura 26. Señal sintetizada de la Flauta con el primer parámetro



En la figura 27, la señal en el tiempo se reduce significativamente respecto a la original ya no se ven picos altos sino que hay un pequeño rizado en ellos.

Figura 27. Señal sintetizada de la Flauta con el segundo parámetro

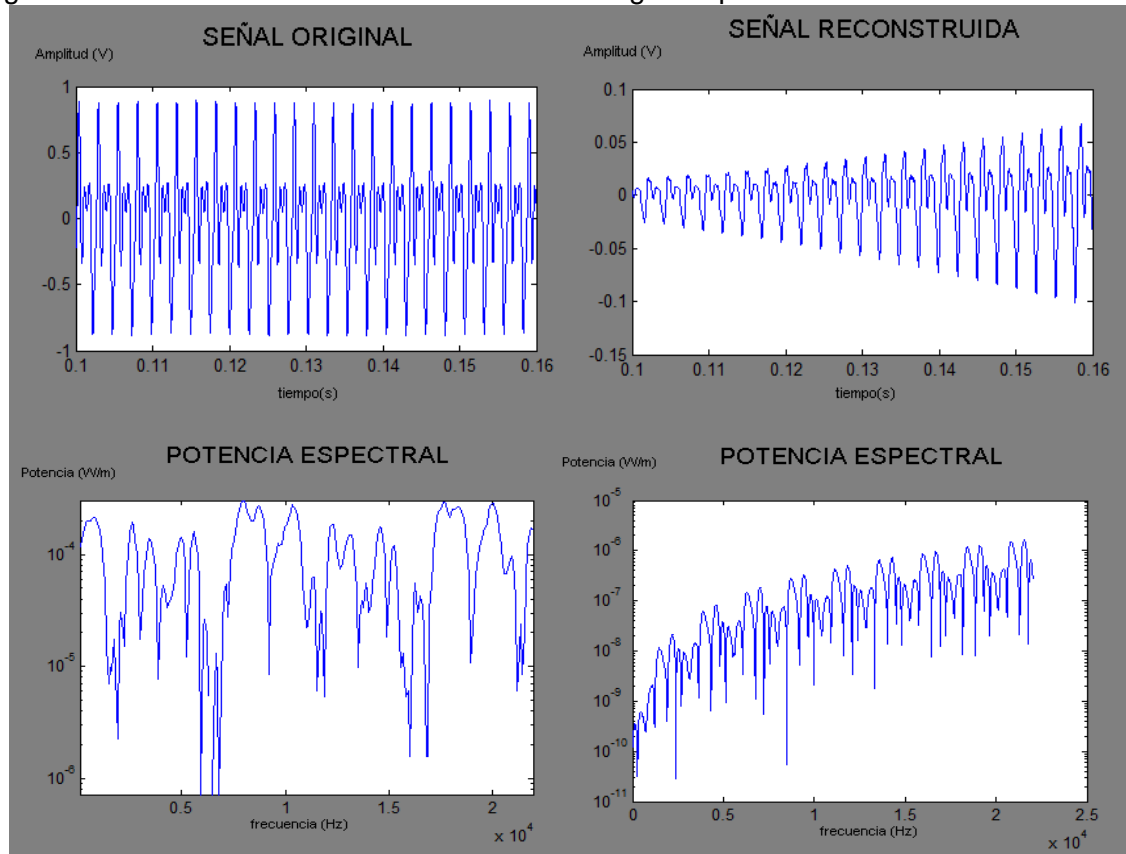
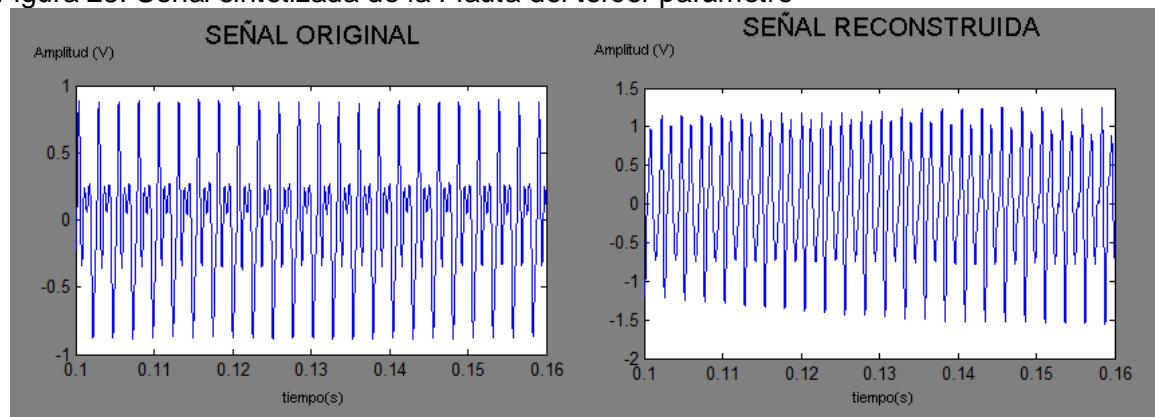
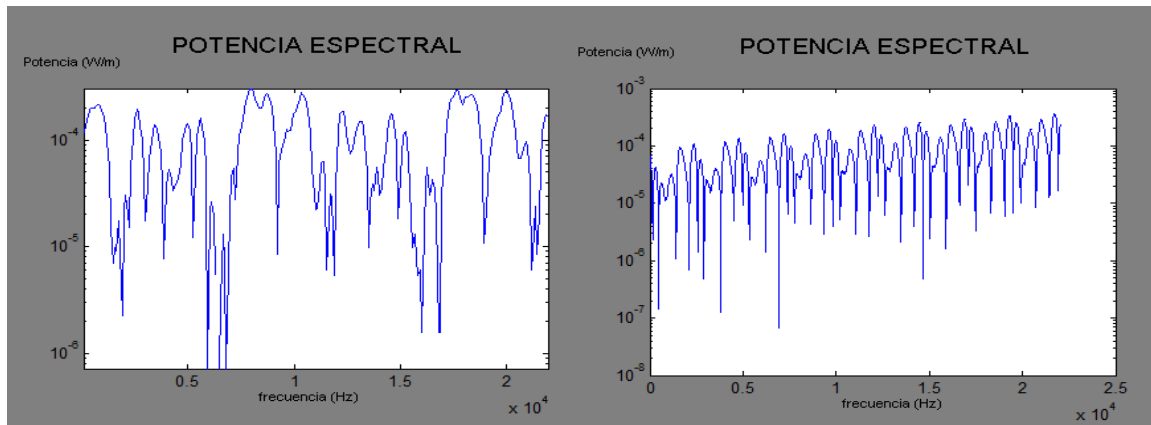


Figura 28. Señal sintetizada de la Flauta del tercer parámetro





A simple vista la señal original y la señal sintetizada de la figura 28 se parecen mucho, pero en la señal sintetizada los picos son más seguidos y el rizado es menor, en el análisis espectral se observa que hay muchos más lóbulos que en las otras síntesis.

## 7.3 PRUEBA DE SEÑAL DE AUDIO DE LA VOZ DE UNA CANTANTE

### 7.3.1 Objetivo de la prueba

Esta prueba se realiza con el fin de observar los cambios que ocurren en la señal de voz de la cantante cuando se varían los parámetros de la ventana envolvente de los granos (fragmentos de sonidos cortos) para realizar la síntesis de la señal original, además demostrar que no solo se puede hacer la síntesis del sonido de un instrumento sino de la voz.

### 7.3.2 Herramientas

Se utiliza el software MATLAB, y un archivo de audio de la voz una cantante, con una duración de tres segundos.

### 7.3.3 Procedimiento

Se van a probar varios parámetros de la ventana envolvente y se observará que pasa con la señal de voz, se podrá observar la señal original su análisis y su respectiva síntesis para cada uno de los valores.

### 7.3.4 Resultados esperados

Se espera que la señal de voz sintetizada tenga cambios tanto en su simulación en tiempo y su análisis en frecuencia como en el sonido que se produce, además los cambios que sufre la voz volviéndose más grave o aguda.

### 7.3.5 Resultados obtenidos

Al abrir el archivo de audio la herramienta se gráfica la señal en tiempo y su análisis en frecuencia.

Figura 29. Señal original de la voz de una cantante

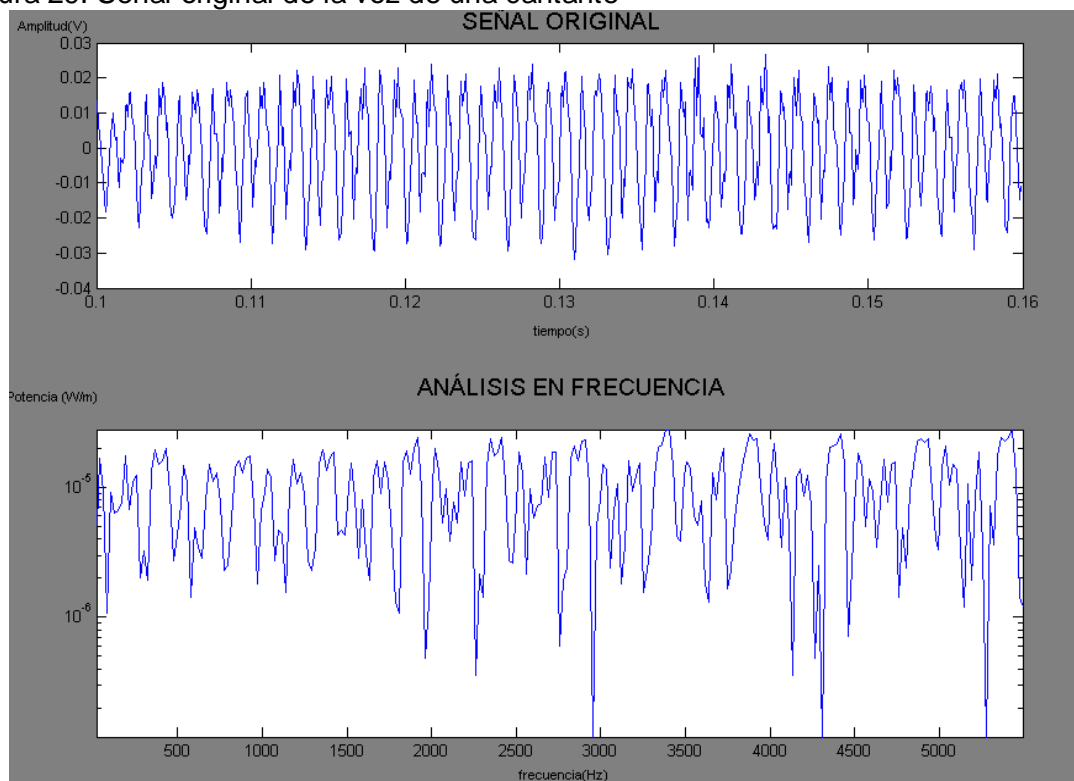


Tabla 16. Parámetros que se variaron en la señal de audio de la cantante

Numero de ventanas	Altura Máxima	Altura Mínima	Ancho	Descripción sonido
25	0.4	0.3	0.1	Se escucha como si se hicieran cortes en la señal baja y sube de tono.
75	0.6	0.4	0.2	Se escucha muy parecido al original pero un poco más agudo.
150	0.7	0.4	0.2	Se escuchan notas más graves y se percibe un efecto de eco en el entorno.

En la figura 30, se observa que la señal comienza siendo un poco más pequeña que la original y luego va aumentando su tamaño manteniéndolo así en el tiempo, en la original siempre permanece constante, en el análisis en frecuencia se observa que la señal es mucho más detallada.

Figura 30. Señal sintetizada de la voz de la cantante del primer parámetro

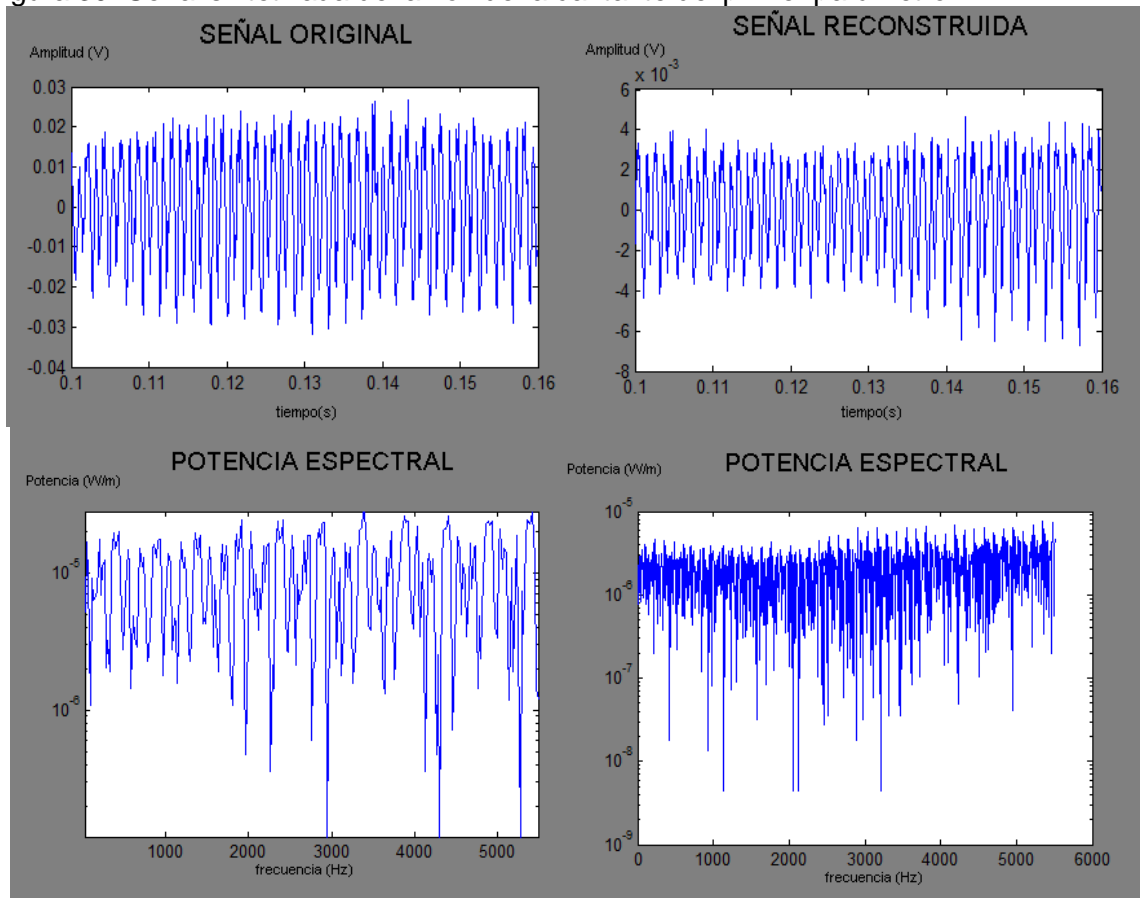
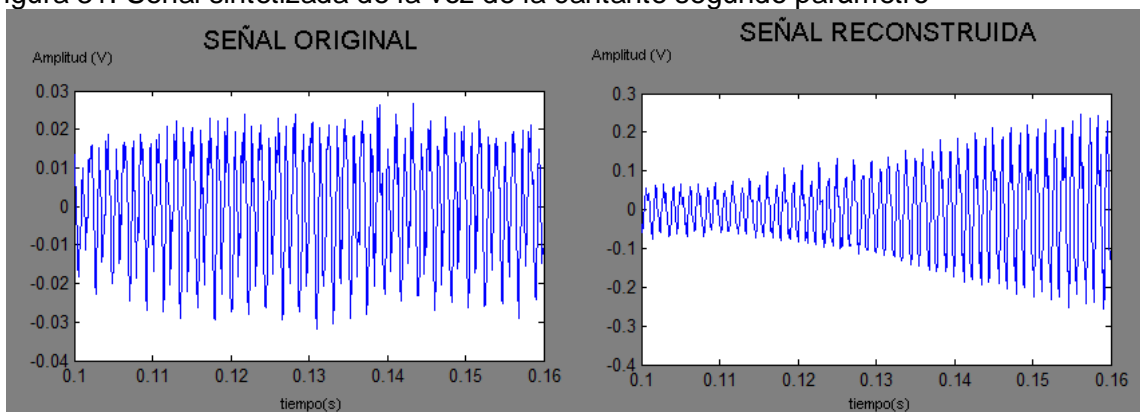
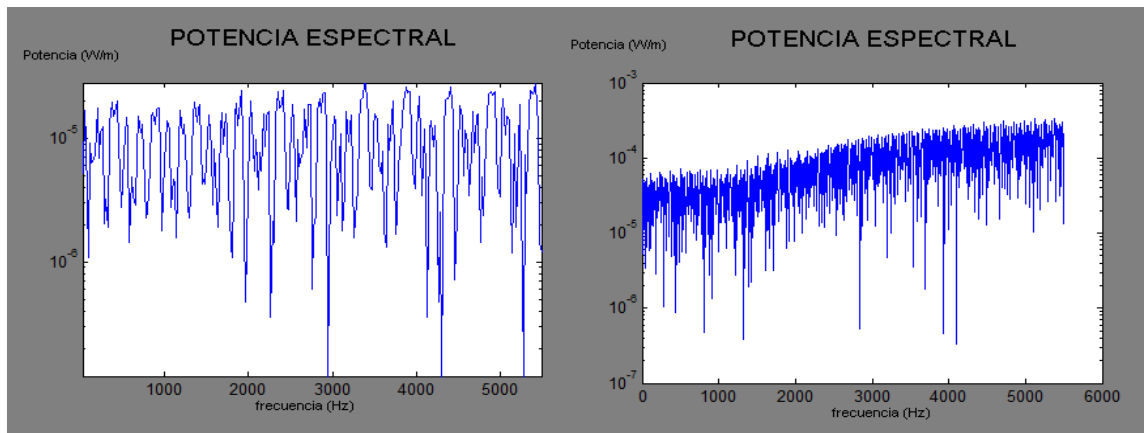


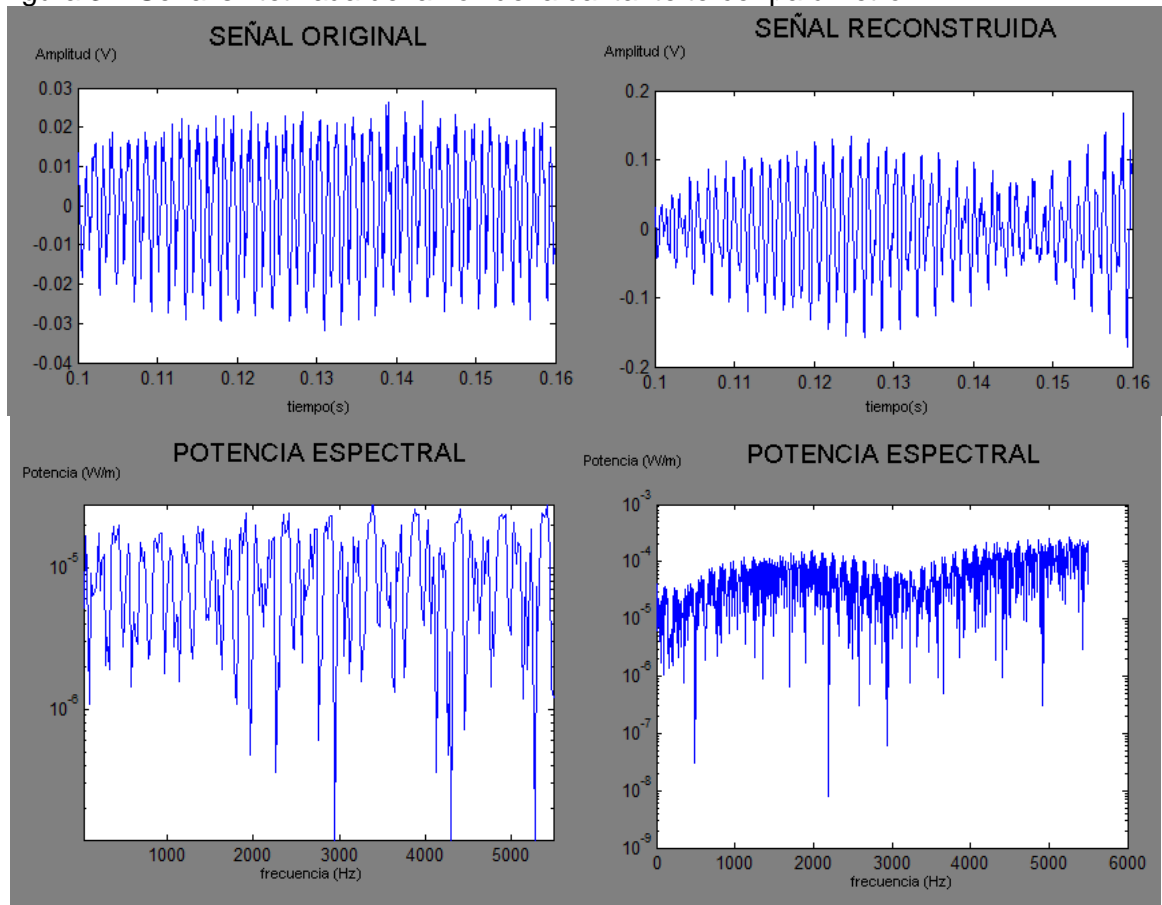
Figura 31. Señal sintetizada de la voz de la cantante segundo parámetro





En la figura 31, se observa que la señal sintetizada es muy pequeña con respecto a la señal original manteniéndose así por un periodo largo de tiempo y luego va aumentando su tamaño.

Figura 32. Señal sintetizada de la voz de la cantante tercer parámetro



En la figura 32, la señal sintetizada comienza tenue y va aumentando su tamaño luego nuevamente disminuye y aumenta nuevamente, la señal original siempre mantiene entre los mismos rango de valores de amplitud.

## 7.4 PRUEBA DE UNA SEÑAL SINTETIZADA DE UN PIANO

### 7.4.1 Objetivo de la prueba

Esta prueba se realiza con el fin de observar si a una señal que ya ha sido sintetizada se le pueden nuevamente realizar cambios en sus características.

### 7.4.2 Herramientas

Se utiliza el software MATLAB, y un archivo de audio sintetizado de un piano, con un segundo de duración.

### 7.4.3 Procedimiento

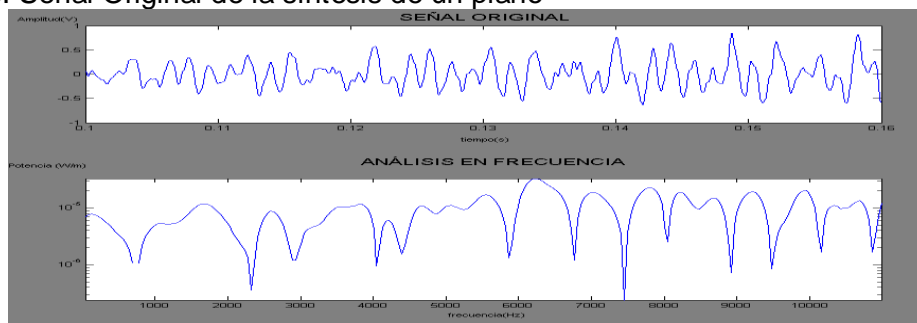
Lo primero que se hizo fue realizar el análisis y síntesis a una señal de piano, luego la señal que se obtuvo de la síntesis se le realiza nuevamente el análisis y su respectiva síntesis.

### 7.4.4 Resultados esperados

Se espera que la señal sintetizada tenga cambios tanto en su simulación en tiempo y su análisis en frecuencia y en el sonido que se produce, de esta forma se podría tener un gran número de tonos ya que si se puede volver a sintetizar la señal se alimentaría ampliamente el banco de tonos.

### 7.4.5 Resultados obtenidos

Figura 33. Señal Original de la síntesis de un piano



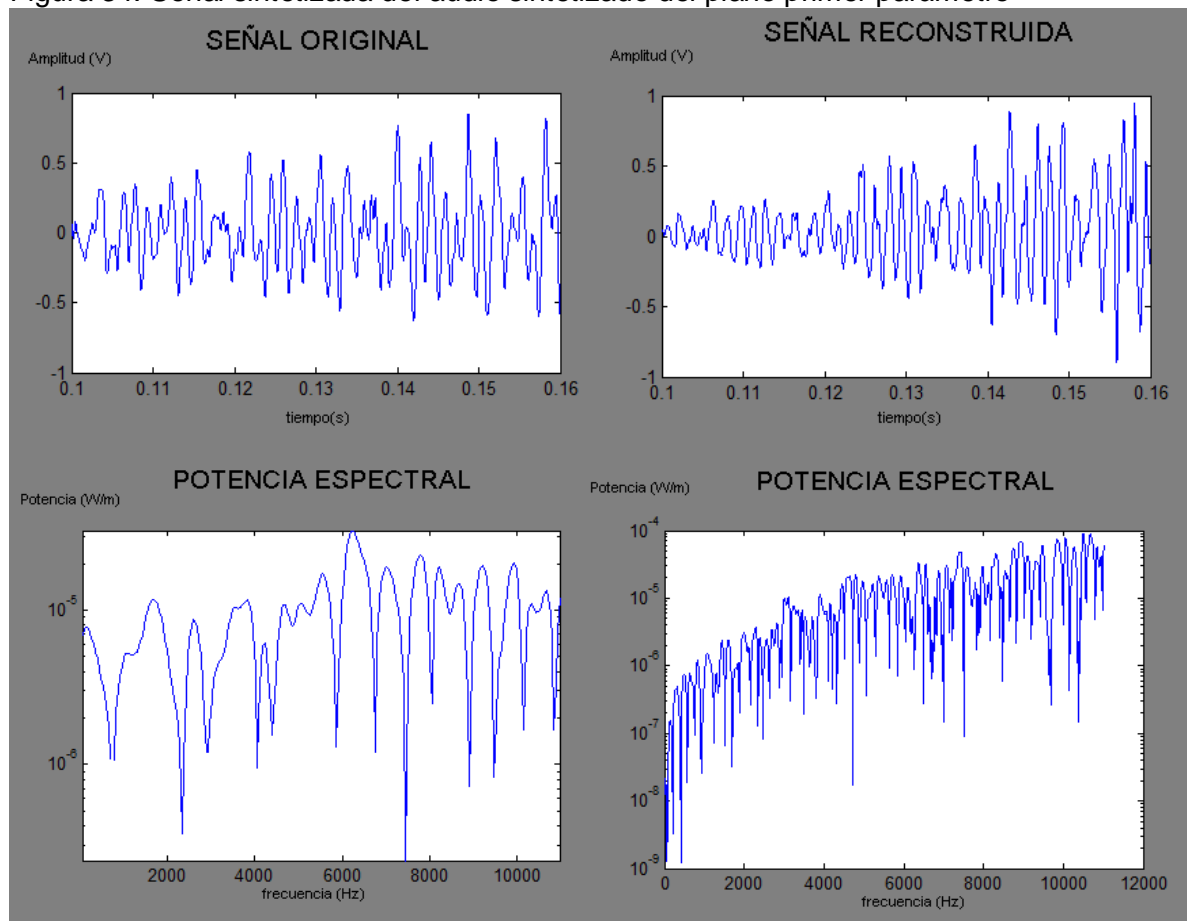
Se van a probar varios parámetros de la ventana envolvente y se observará que pasa con la señal que se sintetizo.

Tabla 17. Parámetros que se variaron en la señal de audio sintetizada

Numero de ventanas	Altura Máxima	Altura Mínima	Ancho	Descripción sonido
40	0.4	0.3	0.1	Se escucha el sonido más alto y más agudo que el original que el original.
90	0.7	0.6	0.3	Es un sonido agudo fuerte y seco.
120	0.5	0.3	0.2	El sonido que se produce es grave, no es muy agradable de escuchar.

Según la figura 34 la señal sintetizada aumenta y disminuye paulatinamente va de valores pequeños a más altos en amplitud, en el análisis se ve la señal mucho más muestreada.

Figura 34. Señal sintetizada del audio sintetizado del piano primer parámetro



En la figura 35, comparada con la original se pueden observar algunas diferencias en los picos y la señal sintetizada tiene valores más pequeños en amplitud

Figura 35. Señal sintetizada del audio sintetizado de un piano segundo parámetro

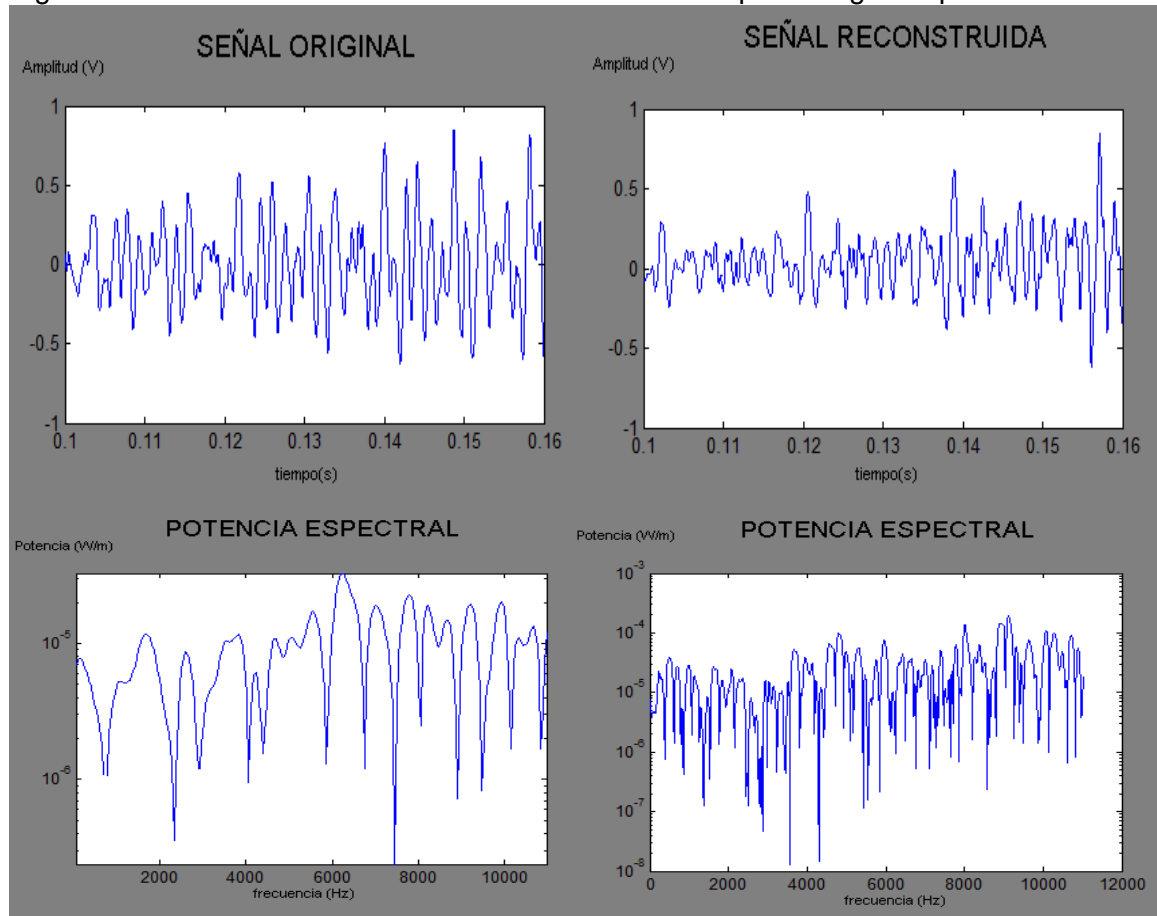
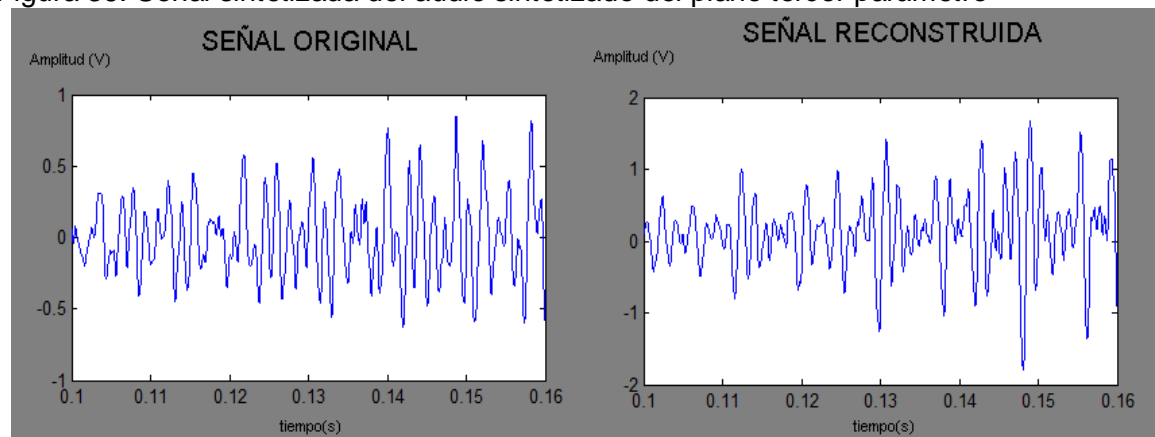
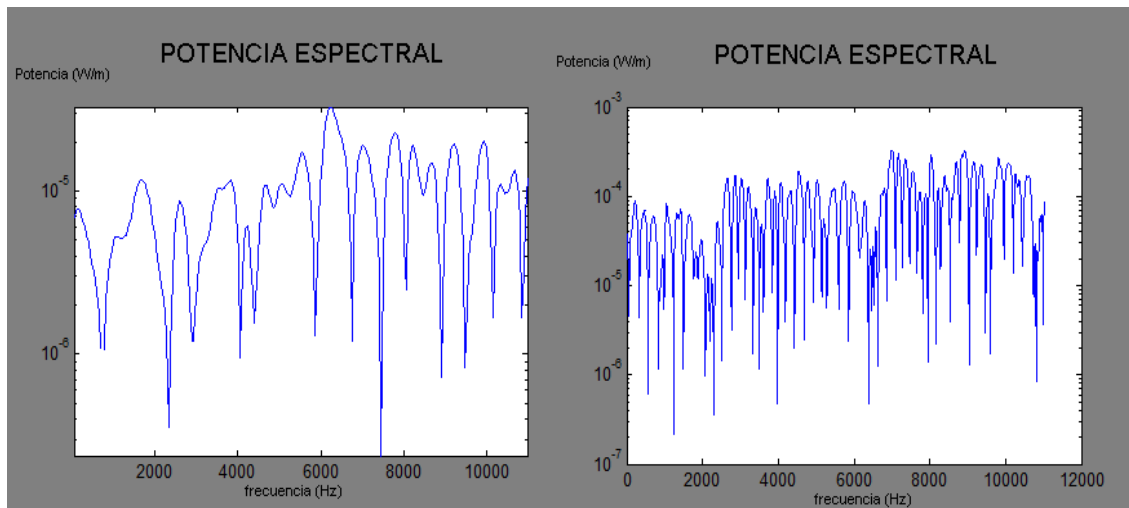


Figura 36. Señal sintetizada del audio sintetizado del piano tercer parámetro





La señal sintetizada de la figura 36, la señal sintetizada que disminuyen y aumentan en el tiempo la señal original se mantiene en algunos valores, se puede observar la señal en frecuencia con más características espectrales.

## 7.5 PRUEBA DE UNA SEÑAL DE AUDIO DE AGUA CON PÁJAROS

### 7.5.1 Objetivo de la prueba

Esta prueba se realiza con el fin de observar otro tipo de sonido con muchos más elementos auditivos como son los pájaros y el agua.

### 7.5.2 Herramientas

Se utiliza el software MATLAB, y un archivo de audio de agua con pájaros, con tres segundo de duración.

### 7.5.3 Procedimiento

Se abre el archivo de audio de audio del agua y los pájaros y se puede observar la señal en tiempo con su análisis en frecuencia, luego se varían los parámetros a la ventana y se obtiene la señal sintetizada.

### 7.5.4 Resultados esperados

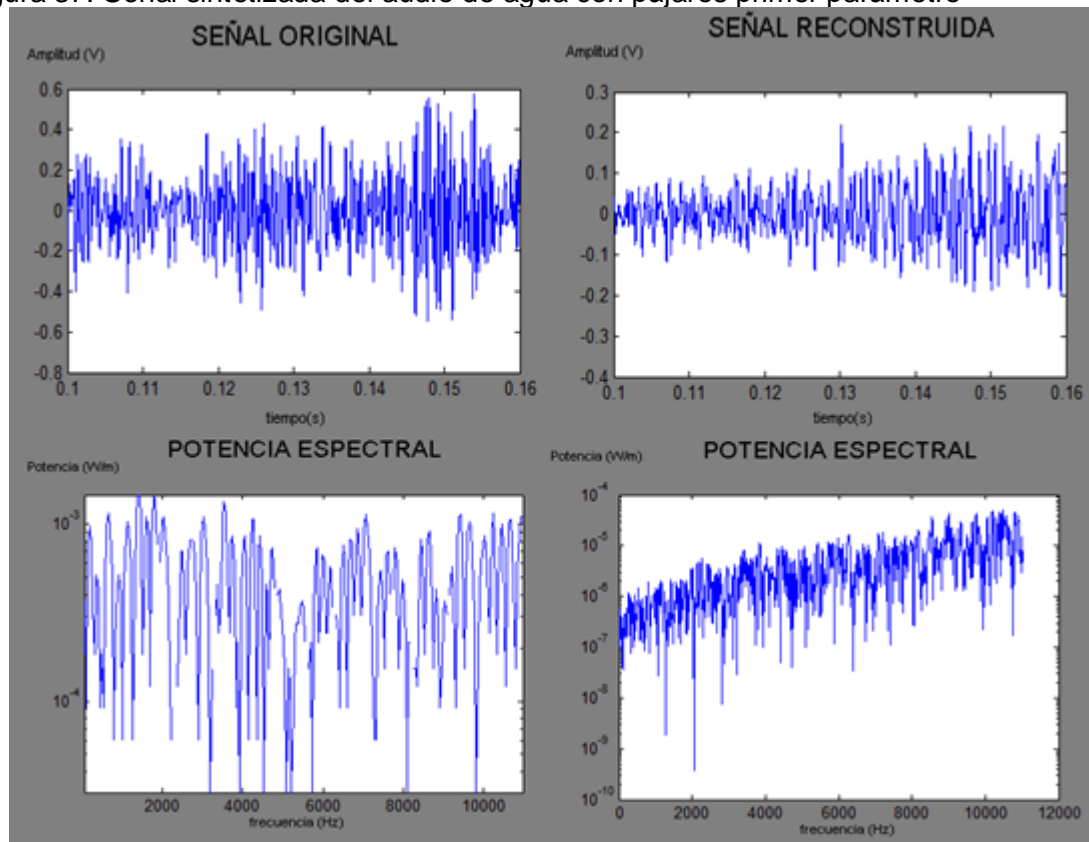
Se espera que la señal sintetizada tenga cambios significativos para poder observar los cambios en el sonido y en su simulación, además es importante escuchar las modificaciones que se le pueden hacer a un archivo con varios tonos.

### 7.5.5 Resultados obtenidos

Tabla 18. Parámetros que se variaron en la señal de audio de agua con pájaros

Numero de ventanas	Altura Máxima	Altura Mínima	Ancho	Descripción sonido
55	0.7	0.5	0.3	El sonido del agua cambia, se repite la señal, comienza el sonido se hace un corte y continua.
80	0.4	0.3	0.1	El sonido del agua suena diferente, agudo
200	0.7	0.4	0.2	Se escucha sonido de agua de mar pero con brisa y grave y no se escuchan los pájaros.

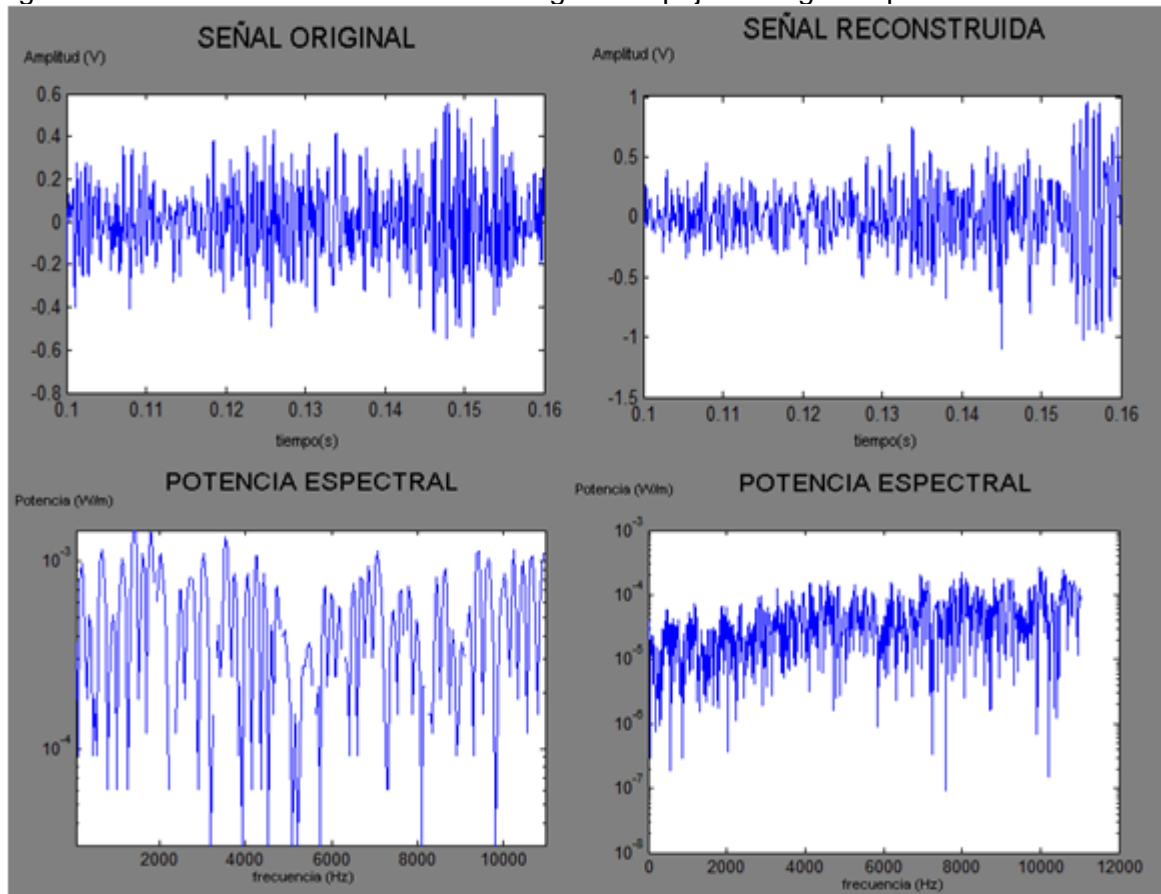
Figura 37. Señal sintetizada del audio de agua con pájaros primer parámetro



En la figura 38, se observa que la señal comienza muy pequeña y luego va aumentando pero no tiene cambios muy abruptos, a diferencia de la señal original que comienza pequeña y luego aumenta manteniéndose así, en el análisis de frecuencia se observa más concentración en de frecuencias en el espectro.

En la figura 39, se observa que la señal a diferencia de la original comienza siendo pequeña y luego va aumentando su tamaño en el transcurrir del tiempo.

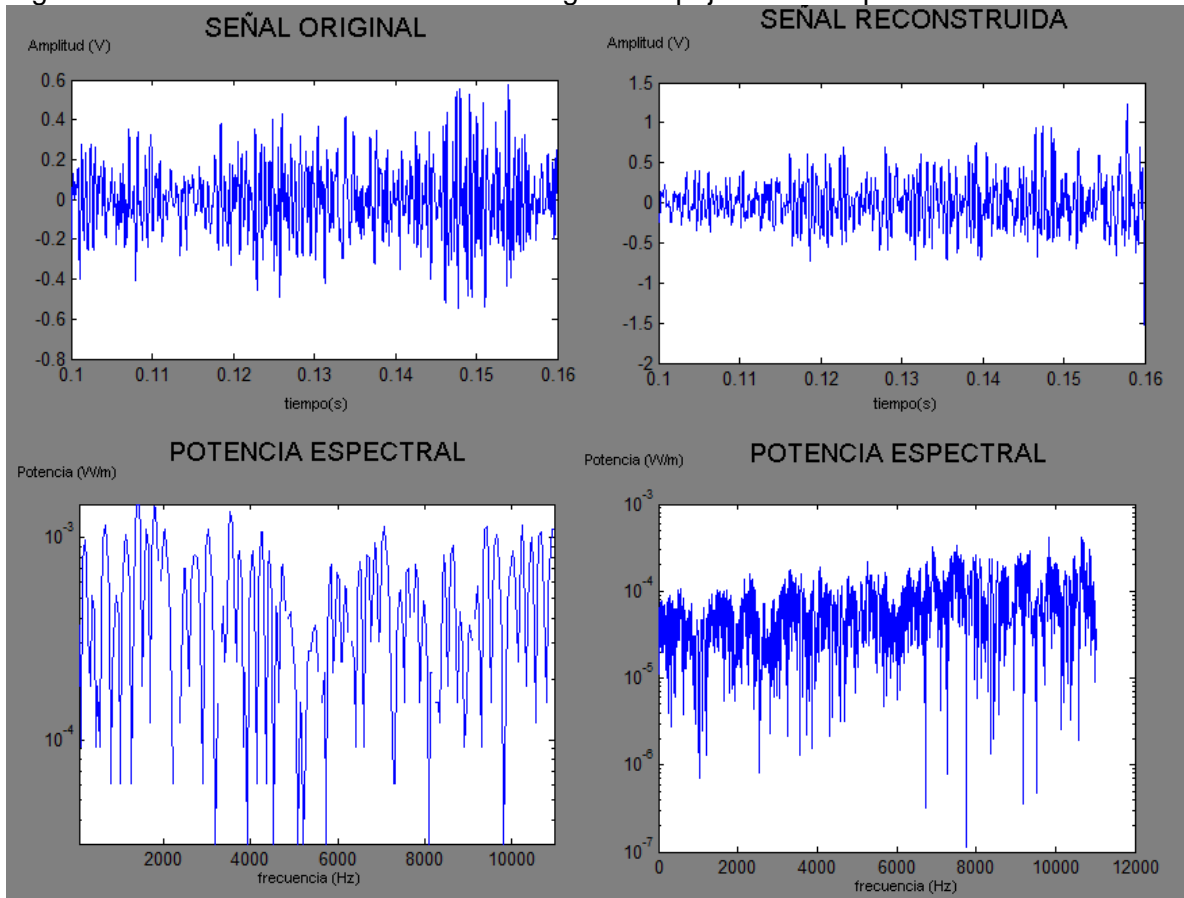
Figura 38. Señal sintetizada del audio de agua con pájaros segundo parámetro



En la figura 40, la señal sintetizada comienza muy disminuida y luego va aumentando y se mantiene entre las mismas amplitudes.

Al realizar las pruebas en los diferentes escenarios se llegó a la conclusión que según las características de la señal si es un tono simple o un archivo con más elementos al momento de sintetizar la señal la que tiene más elementos tiene cambios significativos se pueden eliminar sonidos o cambia de ser un sonido grave a uno agudo, el tono simple sufre modificaciones o cambios suaves.

Figura 39. Señal sintetizada del audio de agua con pájaros tercer parámetro



## 8 CONCLUSIONES

- En el estudio de los tipos de síntesis, se observó que la mayoría de ellos generaban tonos mediante la lectura rápida de señales que tenían almacenadas, la única que permitía manipular las características de los archivos de audio era la síntesis granular utilizada para realizar la reconstrucción de la señal mediante los segmentos extraídos de la señal de audio generando de esta manera nuevas formas de onda.
- La síntesis que se realiza con un número de envolventes que están entre un rango de veinte a treinta, no sufre alteraciones significativas en sus características, cambian suavemente, ya que los segmentos que se toman no hacen que la señal envolvente se solape.
- La síntesis que se genera entre los valores de cuarenta y noventa envolventes, permiten que el sonido de la nueva señal genere un tono agudo con respecto a la señal del archivo original.
- La síntesis que se realiza con un número de ventanas entre cien y doscientos permiten obtener sonidos graves, en este caso por tener un mayor número de ventanas se solapan y generan repeticiones en las muestras de sonido.
- Los archivos de audio que permiten realizar el análisis y síntesis son los que tienen una duración de uno a cinco segundos, ya que si son de mayor duración la capacidad de procesamiento del sistema no permite observar el análisis en frecuencia de la señal y no se puede realizar su síntesis
- En MATLAB se debe trabajar con señales en formato wav y su información debe ser codificada en formato PCM, en caso contrario se genera un error en la información de codificación del archivo y no abrirá.
- Se diseñó una interfaz gráfica amigable que le permite al usuario tener una herramienta en donde pueda observar la representación gráfica de una señal de audio en tiempo, además puede controlar el comportamiento de la señal sintetizada permitiéndole escuchar y guardar la nueva forma de onda.
- El sistema diseñado es práctico y de bajo costo, le permite al usuario a partir de una señal inicial, poder sintetizar cuantas veces quiera el tono, adquiriendo variedad de tonos que le posteriormente podrán ser utilizado en otras herramientas para formas melodías.

## 9 RECOMENDACIONES

- Al manipular archivos de audio en MATLAB se debe tener en cuenta el formato en el que se encuentra y su codificación.
- Se deben tener en cuenta las características de la señal como son frecuencia de muestreo y número de bits, es recomendable que para guardar el archivo se utilice la misma frecuencia de muestreo y número de bits que se adquieren en el momento de leer el archivo de audio esto permitirá tener un banco de tonos audibles.
- Se deben tener en cuenta la duración de los archivos de audio ya que esto define en gran medida la realización del análisis y la síntesis de la señal.

## GLOSARIO

**BANCO DE FILTROS:** Se usa para descomponer la señal de entrada en componentes espectrales submuestreados de tiempo y frecuencia (Kahrs & Brandenburg, 2002).

**CREATIVE LABS:** Es el líder mundial en productos de entretenimiento digital para el ordenador personal (PC) e Internet (Technology, 2003)

**DECIBEL:** Es una décima parte del “Bel” (nombre relacionado con Alexander Graham Bell, telefonía), siempre describe una relación logarítmica entre dos cantidades (Szachniewicz, 2002).

**DFT:** Transformada discreta de Fourier.

**DISCO COMPACTO:** Se trata de un substrato de poli carbonato metalizado con una película de aluminio y recubierto por un barniz plástico protector. La señal se registra del interior al exterior y se lee a una velocidad lineal de 1,25 metros por segundo (Carrasco, 2008).

**DTFT:** Transformada de Fourier en tiempo discreto.

**FILTRO PASA ALTO:** Se caracteriza por tener una banda de paso que ocupa desde  $w = w_c$  hasta el infinito (Soliman & Srinath, 1999).

**FILTRO PASA BAJO:** Se caracteriza por tener una banda de paso que ocupa desde  $w = 0$  hasta  $w = w_c$ , denominada frecuencia de corte del filtro (Soliman & Srinath, 1999).

**FILTRO PASA BANDA:** Se caracteriza por tener una banda de paso que ocupa desde  $w = w_1$  hasta  $w = w_2$ , las restantes frecuencias se eliminan (Soliman & Srinath, 1999).

**HERTZ:** Unidad de frecuencia que se representa con el símbolo Hz y equivale a un ciclo por segundo (Carrasco, 2008).

**INFRASONIDOS:** Ondas acústicas que se propagan en el aire con frecuencias inferiores a 20Hz (Barrera, 2002) .

**MIDI:** Se deriva de las iniciales en inglés musical instrument digital interfase que en español traduce interface digital para instrumentos musicales (Salomón, 1992).

**MODULACIÓN DE FRECUENCIA FM:** Consiste en variar la frecuencia de la onda portadora de acuerdo con la intensidad o amplitud de la onda moduladora (Cairote, 2002).

**MUESTREAR:** Es cortar a trozos una señal continua (analógica) para transformarla en una señal digital formada por valores numéricos, cuantas más muestras se tomen por intervalo de tiempo, mayor calidad se lograra en el sonido (Carrasco, 2008) .

**OSCILACIÓN:** Cambio periódico de la condición o el comportamiento de un cuerpo (M. Castillo, 2004) .

**SAMPLER:** Su función principal es almacenar en su memoria sonidos digitalizados (Puig, 1997) .

**SÍNTESIS FM:** es una tecnología obsoleta que usa fórmulas matemáticas para inventar sonidos que emulan instrumentos musicales. Actualmente se usa, la más moderna y ampliamente usada, síntesis por tabla de ondas (Margüello, 2002).

**SÍNTESIS POR TABLA DE ONDAS:** son muestras (*samples*) digitales de instrumentos, generadas a partir de la grabación de instrumentos reales. Son de alta calidad y se pueden generar tanto por software como por hardware (Margüello, 2002).

**SONIDO:** Es la vibración de un medio elástico, bien sea gaseoso, líquido o sólido (M. Castillo, 2004).

**STFT:** Transformada de Fourier a corto plazo.

**TRANSFORMADA DE FOURIER:** Especifica el contenido espectral de una señal, proporcionando así una descripción en el dominio de la frecuencia (Soliman & Srinath, 1999).

**ULTRASONIDO:** Rango de frecuencias que están por encima del límite de escucha humana  $f > 20\text{KHz}$  (Echevarria, 2002).

**WAV:** todo un estándar en la música digital, soportado por las aplicaciones Windows (Margüello, 2002).

**WAVETABLE:** (Tabla de ondas), consiste en almacenar en una memoria de longitud determinada muestras de la señal original que se va a sintetizar (Herranz, 1997).

## BIBLIOGRAFÍA

- Barrera, C. A. P. (2002). Infrasonidos y ondas acusticas de gravedad. Retrieved from <http://www.scribd.com/doc/6529163/infrasonidos-y-ondas-acusticas-de-gravedad>
- Begoña, I. M. (2009). Análisis tiempo-frecuencia de la señal de vibración de un cambiador de tomas en carga. Universidad carlos III de madrid escuela politecnica superior Leganés, Madrid.
- Borjas, R., & Quispe, N. (1999). Instrumentación virtual para sistemas de medición y análisis de la red eléctrica Revista de la Facultad de ingeniería Universidad de Tarapacá
- Cádiz, R. F. (2008a). Fundamentos de Acústica Musical
- Cádiz, R. F. (2008b). Introducción a la música computacional Available from <http://www.rodrigocadiz.com/imc/html/Prefacio.html>
- Cairote, D. J. (2002). Transmisión de información por radiación electromagnética. Radios. Antenas.
- Camino, M. J. (2008). El sonido. Fundamentos físicos. Retrieved from <http://mariajesusmusica.files.wordpress.com/2008/09/apuntes-sonido.pdf>
- Carrasco, D. E. M. (2008). Sonido profesional. Retrieved from [www.mailxmail.com](http://www.mailxmail.com)
- Castillo, F. J. G. (2000). "Procesamiento digital del sonido e implementación de ecualizador grafico en el EZ-KIT SHARC ADSP21061". Capitulo 4, Pág. 164. Retrieved from <http://www.ieesa.com/universidades/tesis01/>
- Castillo, M. (2004). La ecualización.
- Cortés, J. A., Cano, H. B., & Chaves, J. A. (2007). Del análisis de Fourier a las wavelets-transformada continua wavelet (CWT). Retrieved from <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/849/84903723.pdf>
- Díaz, W. R. (2006). Audio para PC: Mayor potencia y fidelidad. Retrieved from [http://www.tecnologia.com.pe/descrip\\_esp.php?id=9](http://www.tecnologia.com.pe/descrip_esp.php?id=9)

- Echevarria, I. R. (2002). Ultrasonido. Retrieved from [http://fain.uncoma.edu.ar/materias/ensayos\\_no\\_destructivos/Catedra\\_END/6-Ultrasonido/Apunte\\_US.pdf](http://fain.uncoma.edu.ar/materias/ensayos_no_destructivos/Catedra_END/6-Ultrasonido/Apunte_US.pdf)
- Florez, E., Cardona, S., & Jordi, L. (2009). Selección de la ventana temporal en la transformada de Fourier en tiempos cortos utilizada en el análisis de señales de vibración para determinar planos en las ruedas de un tren. *Revista Facultad de ingeniería Universidad de Antioquia*
- Galdson. (1997). Factoría de entornos musicales, El sonido. Retrieved from <http://galdson.com/archivos/tutoriales/el%20sonido.pdf>
- García, C. N. (2000). Arquitectura de ordenadores. Retrieved from <http://www.gooachi.com/cursos/varios/ebooks/perifericos.pdf>
- Gené, O. B. (2006). Reductor de ruido mediante resta espectral en entorno Matlab. Retrieved from [http://oa.upm.es/954/1/PFC\\_ORIOL\\_BORRAS\\_GENE.pdf](http://oa.upm.es/954/1/PFC_ORIOL_BORRAS_GENE.pdf)
- Herranz, D. P. (1997). Nuevas tendencias en síntesis musical. Retrieved from [http://oa.upm.es/548/1/DANIEL\\_PASCUAL\\_HERRANZ.pdf](http://oa.upm.es/548/1/DANIEL_PASCUAL_HERRANZ.pdf)
- Isover, D. T. c. d. (2006). Caracterizando el sonido La frecuencia. Retrieved from [http://www.isover.net/asesoria/revista\\_club/018/secciontec.pdf](http://www.isover.net/asesoria/revista_club/018/secciontec.pdf)
- Kahrs, M., & Brandenburg, K. (2002). Applications of digital signal processing to audio and acoustics
- Margüello, J. (2002). Tarjetas de sonido Consejos para comprar un elemento clave de nuestro PC. Retrieved from [http://cfievalladolid2.net/tecno/recursos/c\\_hardware/archivos/Manual14-8.pdf](http://cfievalladolid2.net/tecno/recursos/c_hardware/archivos/Manual14-8.pdf)
- Mathworks, T. (Producer). (1994) The Mathworks. Retrieved from <http://www.mathworks.com/company/>
- Mertins, A. (1999). Signal Analysis: Wavelets, Filter Banks, Time-Frequency Transforms and Applications
- Mitra, S. K. (1998). Digital signal processing. New York McGraw-Hill.

- Morilla, J. A. P. (2006). Curso práctico de sonido Retrieved from <http://www.mailxmail.com/b-sonido>
- Prieto, D., & Reyes, J. (2001). Fundamentos de Sintesis de audio con granos Retrieved from <http://www.maginvent.org/articulos/granintro/granintro.html>
- Puig, S. J. (1997). Guía Monográfica Audio digital y MIDI Available from <http://www.ccapitalia.net/reso/articulos/audiodigital/index.htm>
- Rocchesso, D. (2003). Introduction to digital audio signal processing. Venezia.
- Salomón, C. R. (1992). Introducción al MIDI. Retrieved from <http://www.paginasprodigy.com.mx/carlossalomon/midi.pdf>
- Sampieri, J. L. (2006). Todo sobre las tarjetas de sonido. Retrieved from <http://www.elmundodecordoba.com/index>
- Soliman, S., & Srinath, M. (1999). Señales y sistemas continuos y discretos. Madrid: Pearson educación, S.A. .
- Szachniewicz, R. (2002). Curso intensivo de sonido, Modulo I.
- Tarazona, M. (2000). ¿Qué es una tarjeta de sonido? . Retrieved from <http://www.conozcasuhardware.com/quees/tsonido1.htm>
- Technology, C. (Producer). (2003) Herramientas para audio Creative. retrieved from [www.creative.com/soundblaster/](http://www.creative.com/soundblaster/)
- Velásquez, J., & Rodríguez, J. M. (2007). El sonido, la fuerza creativa del universo. Retrieved from [http://www.soisdioses.com/musica/sonido\\_fuerza\\_creativa.html](http://www.soisdioses.com/musica/sonido_fuerza_creativa.html)
- Yaya, N. R. (2010). Diagrama de bloques desarrollo proyecto Banco de síntesis de formas de onda para audio Bogotá

## ANEXOS

### Anexo 1. Guía para utilizar la interfaz gráfica

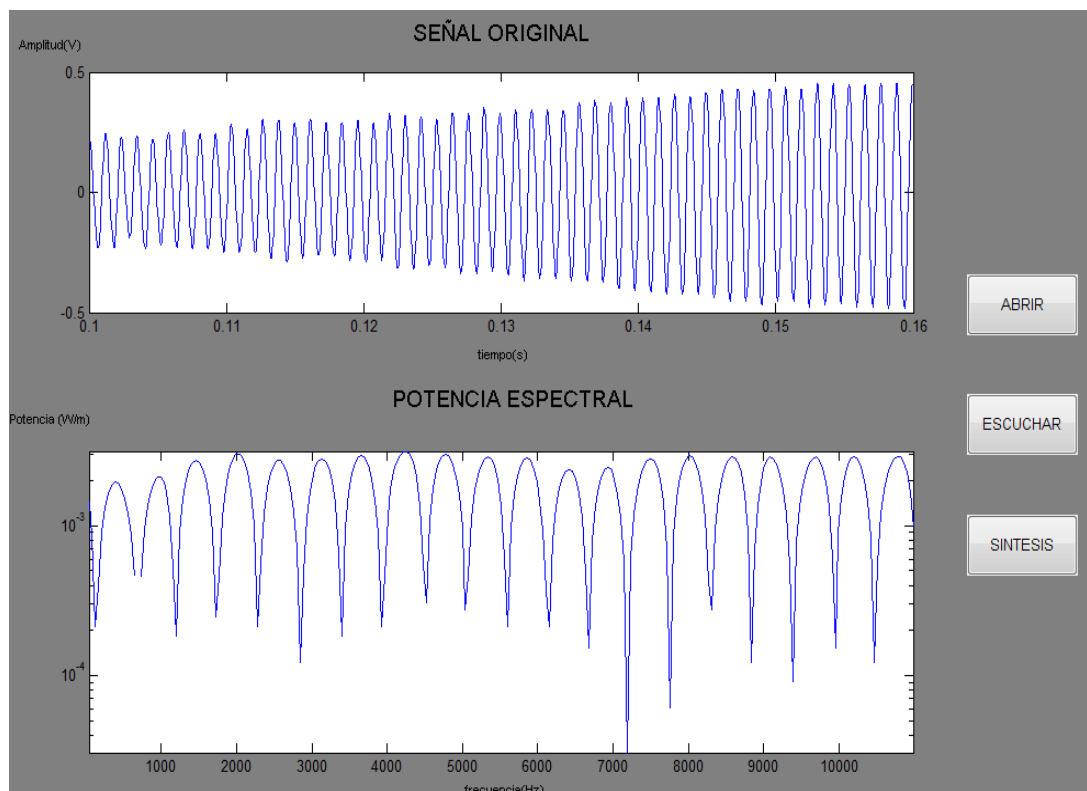
Al abrir la interfaz gráfica se observa la presentación del proyecto.

En la ventana 2 el usuario encontrara:

**Botón de abrir:** Se selecciona el archivo de audio deseado.

**Botón escuchar:** Se escucha el archivo de audio de forma normal como si fuera en el reproductor Windows Media Player.

**Botón sintetizar:** Se abre la ventana de parámetros.



**Características del archivo de audio:** Para esta herramienta se debe utilizar archivos de audio de una duración de (1) uno a (5) cinco segundos de esta manera podrá obtener la señal en tiempo y su análisis en frecuencia.

En la ventana de parámetros:

**Numero de ventanas:** Deben estar dentro del rango de 25 a 200 ventanas

**Límite superior:** Esta entre el rango de 0.2 a 0.9, este rango se establece porque hay que tomar valores pequeños respecto a la señal.

**Límite inferior:** Esta entre el rango de 0.1 a 0.8.

**Ancho:** Rango 0.1 a 0.8 es importante que este valor este entre el coeficiente máximo y mínimo.

INGRESE VALOR DE PARAMETROS

NUMERO DE VENTANAS

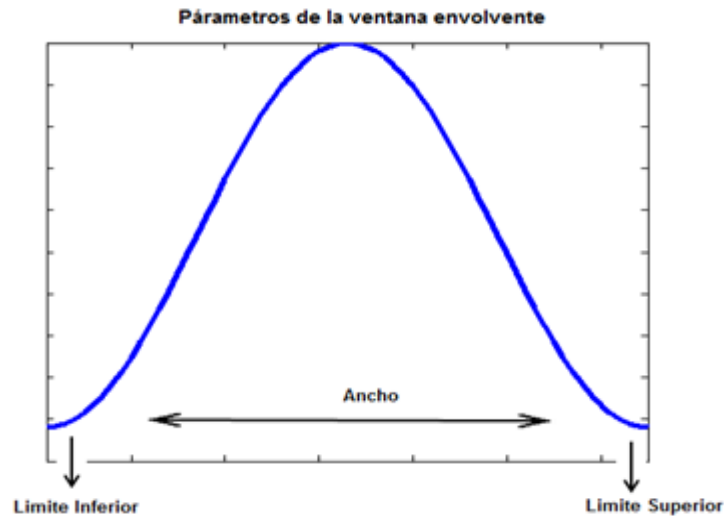
LÍMITES VENTANA

LÍMITE SUPERIOR      LÍMITE INFERIOR

ANCHO

CONTINUAR

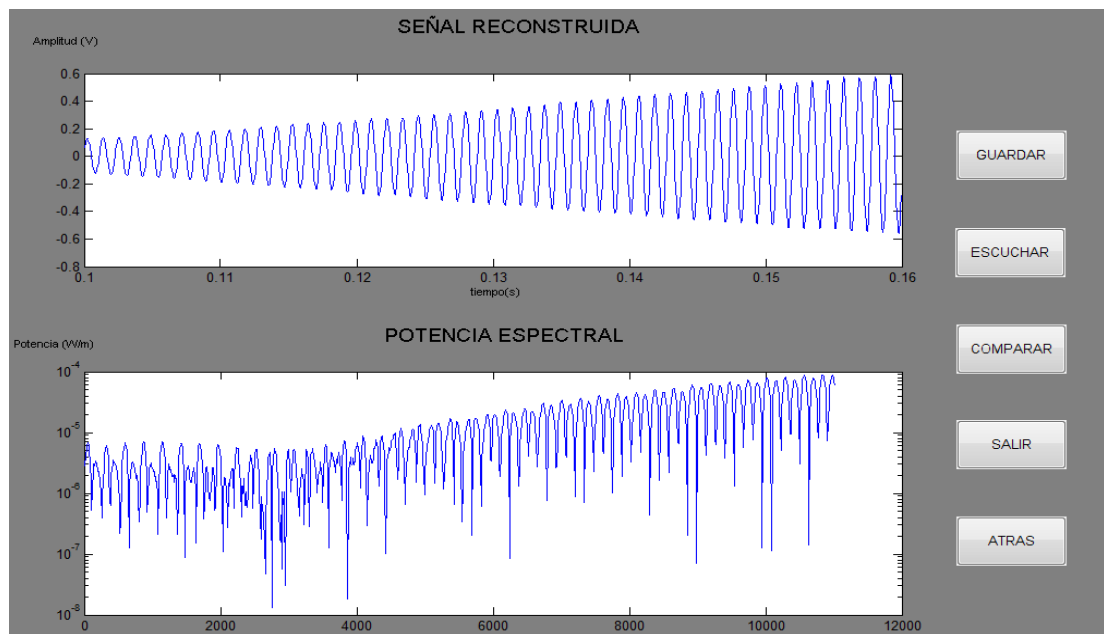


Al poner el botón continuar se abre otra ventana que presenta la señal sintetizada y su análisis en frecuencia.

**Botón guardar:** Se puede guardar la señal de audio generada, se guarda en formato wav, en la carpeta de MATLAB.

**Botón escuchar:** Se puede escuchar el sonido sintetizado.

**Botón comparar:** Abre una ventana donde están la gráfica de la señal original y sintetizada.



La interfaz de comparación permite a ver la representación de las dos señales la original y la sintetizada se pueden escuchar y guardar la sintetizada.

**Botón guardar:** Se puede guardar la señal de audio generada, se guarda en formato wav, en la carpeta de MATLAB.

**Botón escuchar original:** Se puede escuchar el archivo de audio original.

**Botón escuchar sintetizada:** Se puede escuchar la señal sintetizada.

**Inicio:** Se devuelve a la ventana 2.

