

## RAE

1. **Tipo de documento:** Trabajo de grado para optar por el título de INGENIERO DE SONIDO
2. **Título:** Vst Sintetizador de Guitarra acústica por síntesis aditiva basada en sistemas oscilatorios amortiguados
3. **Autor(es):** Joan Alexander Rosas Guerra
4. **Lugar:** Bogota D.C
5. **Fecha:** Octubre de 2018
6. **Palabras claves:** Síntesis de sonido, Sistemas oscilatorios, Guitarra acústica, Octavas, Cuerdas, Análisis de señales, Modelamiento matemático, comportamiento oscilatorio, regresión exponencial, Flowstone, STFT.
7. **Descripción del trabajo:** En este trabajo se investiga y se desarrolla una nueva técnica para síntesis de instrumentos musicales virtuales (VSTi), tomando la guitarra como caso de estudio y el comportamiento oscilatorio de su sonido particular como modelo para elaborar el sintetizador.
8. **Línea de investigación:** Línea de Investigación de la Universidad: Tecnologías Actuales y Sociedad. Sub línea de Facultad de Ingeniería: Análisis y Procesamiento de Señales. Campo Temático del Programa: Control.
9. **Metodología:** La investigación es de carácter empírico analítico, inicialmente se obtuvieron las bases teóricas adecuadas que permiten establecer un planteamiento coherente para el desarrollo de la investigación
10. **Conclusiones:** Aproximar el comportamiento del decaimiento de la amplitud para cada armónico a una ecuación exponencial decreciente es funcional para caracterizar la envolvente de instrumentos de cuerda pulsada, ya que al implementar éste modelo en el sintetizador se obtiene un sonido que se asemeja al de una cuerda pulsada. La envolvente del sonido grabado y la envolvente del sonido del sintetizador difieren, ya que la representación digital de la envolvente está condicionada por la plataforma donde se caracterizó. Para este proyecto, el módulo de creación de envolvente contempla variables computacionales como el tamaño en bits para el buffer de la memoria que determina cada cuántas muestras se caracteriza la envolvente.

# **Vst Sintetizador de Guitarra Acústica por síntesis aditiva basada en sistemas oscilatorios amortiguados**

**Joan Alexander Rosas Guerra**

Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá  
Facultad de Ingeniería  
Programa de Ingeniería de Sonido  
Bogotá, Colombia  
2018



# **Vst Sintetizador de Guitarra Acústica por síntesis aditiva basada en sistemas oscilatorios amortiguados**

**Joan Alexander Rosas Guerra**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de ingeniero de sonido:

Director  
Msc. Raúl Enrique Rincón Flórez

Línea de Investigación:  
Tecnologías Actuales y Sociedad  
Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá  
Facultad de Ingeniería  
Programa de Ingeniería de Sonido  
Bogotá, Colombia  
2018



## 4 Vst Sintetizador de Guitarra Acústica por síntesis aditiva basada en sistemas oscilatorios amortiguados

### **Resumen**

En este trabajo se investiga y se desarrolla una nueva técnica para síntesis de instrumentos musicales virtuales (VSTi), tomando la guitarra como caso de estudio y el comportamiento oscilatorio de su sonido particular como modelo para elaborar el sintetizador. En el transcurso de la investigación se utilizaron elementos de varias disciplinas como el análisis de señales, sistemas oscilatorios, técnicas de captura de sonido, regresiones exponenciales y síntesis del sonido. Para el desarrollo de la investigación se hizo un análisis espectral del sonido original de la guitarra, se implementó el sistema masa-resorte-amortiguador como analogía para modelar el comportamiento de los armónicos de la guitarra y hallar los parámetros de las ecuaciones de movimiento, finalmente se desarrolló un plug-in VSTi en la plataforma Flowstone implementando el método de síntesis aditiva con 11 osciladores que atenúan su amplitud en el tiempo bajo los parámetros hallados en el análisis espectral y el modelo matemático.

**Palabras clave:** Síntesis aditiva, Análisis espectral, Comportamiento oscilatorio, modelo matemático.

## **Abstract**

This paper is based on the investigation and development of a brand new musical instruments synthesis technique, taking the guitar as a case of study and the oscillatory behavior of his particular sound as a model to make the synthetizer. On the road of the investigation were used elements of various disciplines as the signal analysis, oscillatory systems, sound recording techniques, exponential regressions and sound synthesis. In the investigation development was made an spectral analysis on the guitar original sound, then was implemented de mass-spring-damper as analogy for modelling the behavior of guitar armonics and find the movement equations parameters, finally was developed a VSTi plug-in at Flowstone platform using the additive synthesis method with 11 oscilators that decrease its amplitude on time under the parameters found on the spectral analysis and mathematic model.

**Keywords:** Additive Synthesis, Spectral analysis, Oscillatory Behavior, Mathematic Model

## **Introducción**

En la producción de audio y principalmente en los campos de producción musical y audiovisual, la síntesis del sonido ha sido una herramienta esencial para obtener sonidos que no se obtienen en la naturaleza ya que ésta herramienta ofrece versatilidad a la hora de crear sonidos únicos, personalizados y ajustados con precisión a las necesidades sonoras y características tímbricas específicas para una producción sonora. Para elaborar sintetizadores se hace necesario aplicar modelos matemáticos que permitan dado el caso aproximarse al sonido real de un instrumento musical. Teniendo en cuenta que el timbre en el que se basa este sintetizador es el de un instrumento de cuerda pulsada como lo es una guitarra acústica, el desarrollo de éste implementa el modelo matemático de la sumatoria de armónicos propios de la síntesis aditiva para su caracterización tímbrica y el modelo de un sistema oscilatorio subamortiguado para su envolvente ya que al ser un instrumento de cuerda, éste es modelable desde el punto de vista físico como un sistema oscilatorio que atenúa su amplitud en el tiempo. En el modelado de sistemas oscilatorios hay 3 variables de entrada que definen las características del sistema que son: La masa ( $m$ ), el coeficiente de amortiguación ( $c$ ) y la constante de oscilación ( $k$ ), dependiendo de las magnitudes de estas variables los sistemas pueden ser: Sobreamortiguados, subamortiguados y críticamente amortiguados, para el caso del sintetizador a desarrollar, las características del sistema deben satisfacer las condiciones para que el sistema sea subamortiguado teniendo en cuenta que la frecuencia es una constante dada por el contenido armónico y notas del instrumento. Para este sintetizador se desarrollará un modelo que permita controlar el sintetizador a través de la variable física de amortiguamiento hallada a partir del sonido real de la guitarra.

# Contenido

<b>Abstract</b> .....	<b>5</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>6</b>
<b>1 Capítulo I: Problema de investigación</b> .....	<b>14</b>
1.1 Planteamiento del problema.....	14
1.2 Objetivos .....	14
1.2.1 Objetivo General.....	14
1.2.2 Objetivos Específicos.....	14
1.3 Justificación.....	15
<b>2 Capítulo II: Marco de Referencia</b> .....	<b>15</b>
2.1 Antecedentes .....	15
2.1.1 Modelamiento por medición acústica .....	16
2.2 Marco Conceptual .....	16
2.2.1 Modelos para música y audio .....	16
2.2.2 Presión sonora y nivel de presión sonora.....	17
2.2.3 Potencia acústica y nivel de potencia acústica.....	17
2.2.4 Crecimiento y decrecimiento exponencial.....	18
2.2.5 Decaimiento de energía para oscilaciones amortiguadas.....	19
2.2.6 Regresión exponencial .....	19
2.2.7 Audio decay time .....	20
2.2.8 MIDI .....	20
2.2.9 Note Pitch.....	21
2.2.10 Plug-in.....	21
2.2.11 VST.....	22
2.2.12 DSP .....	22
2.2.13 Síntesis de modelos físicos .....	22
2.2.14 Síntesis aditiva .....	22
2.2.15 Modulación de la envolvente acústica para sintetizadores .....	23
2.2.16 FT (Fourier Transform).....	24
2.2.17 STFT (Short-Time Fourier Transform) .....	25

2.2.18	Ventanas.....	26
2.2.19	Ventana Kaiser.....	26
2.2.20	Movimiento Oscilatorio.....	27
2.2.21	Fuerzas recuperadoras elásticas.....	27
2.2.22	Sistemas oscilatorios amortiguados.....	27
2.2.23	Caso Subamortiguado.....	29
2.2.24	Matlab.....	30
2.2.25	Flowstone.....	30
2.2.26	Lenguaje Ruby.....	30
<b>3</b>	<b>Capítulo III: Diseño Metodológico.....</b>	<b>30</b>
3.1	Enfoque y tipo de investigación.....	30
3.2	Recopilación de datos.....	32
3.3	Variables o categorías de análisis.....	33
3.4	Instrumentos.....	33
<b>4</b>	<b>Capítulo IV: Desarrollo Ingenieril.....</b>	<b>34</b>
4.1	Obtención de la señal de la guitarra.....	40
4.1.1	Grabación del instrumento.....	40
4.1.2	Filtrado de ruido.....	41
4.2	Análisis de la señal y obtención de los parámetros de entrada del sintetizador.....	42
4.2.1	Obtención del contenido energético de los armónicos.....	43
4.2.2	Algoritmo para caracterizar el contenido energético en los armónicos de una nota musical.....	46
4.2.3	Obtención de los parámetros de entrada.....	61
4.3	Análisis de proporcionalidad para representar la amplitud de los armónicos.....	67
4.4	Algoritmo del sintetizador.....	67
4.4.1	Requerimientos de usuario.....	68
4.4.2	Conversión del valor de pitch a frecuencia de oscilación.....	69
4.4.3	Módulos y arreglos de amplitud, tiempo de decaimiento y amortiguamiento..	71
4.4.4	Amplitud.....	73
4.4.5	Tiempo de decaimiento.....	74
4.4.6	Amortiguamiento.....	75
4.4.7	Módulo de la envolvente.....	77
4.4.8	Reverb.....	81

4.4.9	Interfaz gráfica .....	81
<b>5</b>	<b>Capítulo V: Pruebas y resultados.....</b>	<b>83</b>
5.1	Pruebas .....	83
5.2	Resultados .....	85
5.2.1	Espectro en frecuencia de las notas obtenidas en el sintetizador comparado con el espectro en frecuencia de las notas originales .....	85
5.2.2	Envolventes original y caracterizada de las notas.....	89
<b>6</b>	<b>Capítulo VI: Discusión .....</b>	<b>92</b>
<b>7</b>	<b>Capítulo VII: Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>94</b>
7.1	Conclusiones .....	94
7.2	Recomendaciones.....	96
<b>8</b>	<b>Capítulo VIII: Referencias.....</b>	<b>97</b>
	<b>Jorda Puig, Sergi. Audio Digital y MIDI (Completo, 1997) .....</b>	<b>99</b>

## Lista de figuras.

<b>Figura 2-1</b>	Imagen del decaimiento de la amplitud de una función exponencial .....	20
<b>Figura 2-2</b>	Conversión de nota musical a valor de pitch en MIDI.....	21
<b>Figura 2-3</b>	Diagrama en bloques de la síntesis aditiva. ....	23
<b>Figura 2-4</b>	Envolvente acústica de instrumentos musicales .....	24
<b>Figura 2-5</b>	Sistema masa-resorte-amortiguador.....	28
<b>Figura 2-6</b>	Oscilador subamortiguado .....	29
<b>Figura 3-1</b>	Fases para la obtención del sonido de la guitarra.....	31
<b>Figura 3-2</b>	Fases para la obtención de los parámetros de las ecuaciones .....	31
<b>Figura 3-3</b>	Diagrama en bloques del sintetizador. ....	31
<b>Figura 3-4</b>	Especificaciones e imagen del Micrófono ECM 8000.....	34
<b>Figura 3-5</b>	Interfaz RME FIREFACE 400.....	34
<b>Figura 4-1</b>	Circuitos eléctricos análogos entre variables físicas y variables eléctricas.....	38
<b>Figura 4-2</b>	Módulo principal del sintetizador. ....	39
<b>Figura 4-3</b>	Flujo de señal de la grabación.....	40
<b>Figura 4-4</b>	Medición del $Rt60$ para la Sala de mastering de la Universidad San Buenaventura .....	41
<b>Figura 4-5</b>	Herramienta de reducción adaptativa de ruido.....	42
<b>Figura 4-6</b>	Diagrama de flujo para obtener los parámetros de entrada.....	42
<b>Figura 4-7</b>	Algoritmo para caracterizar el contenido energético en los armónicos de una nota. ....	46
<b>Figura 4-8</b>	Caracterización de la ventana utilizada.....	47
<b>Figura 4-9</b>	Comportamiento energético de la frecuencia fundamental de la nota F2 .....	49
<b>Figura 4-10</b>	Comportamiento energético del segundo armónico de la nota F2 .....	50
<b>Figura 4-11</b>	Comportamiento energético del tercer armónico de la nota F2 .....	50
<b>Figura 4-12</b>	Comportamiento energético del cuarto armónico de la nota F2 .....	51
<b>Figura 4-13</b>	Comportamiento energético del quinto armónico de la nota F2 .....	51
<b>Figura 4-14</b>	Comportamiento energético del sexto armónico de la nota F2.....	52
<b>Figura 4-15</b>	Comportamiento energético del octavo armónico de la nota F2.....	52
<b>Figura 4-16</b>	Comportamiento energético del décimo armónico de la nota F2.....	53
<b>Figura 4-17</b>	Comportamiento energético del doceavo armónico de la nota F2 .....	53
<b>Figura 4-18</b>	Comportamiento energético del decimosexto armónico de la nota F2 .....	54
<b>Figura 4-19</b>	Comportamiento energético del vigésimo armónico de la nota F2.....	54
<b>Figura 4-20</b>	Envolvente de la frecuencia fundamental para la nota F2.....	56
<b>Figura 4-21</b>	Envolvente del segundo armónico para la nota F2 .....	56
<b>Figura 4-22</b>	Envolvente del tercer armónico para la nota F2.....	57
<b>Figura 4-23</b>	Envolvente del cuarto armónico para la nota F2.....	57
<b>Figura 4-24</b>	Envolvente del quinto armónico para la nota F2.....	58
<b>Figura 4-25</b>	Envolvente del sexto armónico para la nota F2 .....	58
<b>Figura 4-26</b>	Envolvente del octavo armónico para la nota F2 .....	59
<b>Figura 4-27</b>	Envolvente del décimo armónico para la nota F2 .....	59
<b>Figura 4-28</b>	Envolvente del doceavo armónico para la nota F2 .....	60

<b>Figura 4-29</b>	Envolvente del decimosexto armónico para la nota F2 .....	60
<b>Figura 4-30</b>	Envolvente del segundo armónico para la nota F2.....	61
<b>Figura 4-31</b>	Diagrama de flujo para obtener la amplitud máxima de cada armónico .....	62
<b>Figura 4-32</b>	Diagrama de flujo para obtener la constante de amortiguamiento y el tiempo de decaimiento. ....	64
<b>Figura 4-33</b>	Diagrama de flujo para el diseño del sintetizador .....	68
<b>Figura 4-34</b>	Módulo MIDI Splitter.....	70
<b>Figura 4-35</b>	Detalle de caracterización de dos armónicos.....	70
<b>Figura 4-36</b>	Knob de amortiguamiento .....	71
<b>Figura 4-37</b>	Módulos de tiempos amplitudes y amortiguaciones.....	72
<b>Figura 4-38</b>	Calibración de valores para que el sintetizador trabaje desde F2.....	72
<b>Figura 4-39</b>	Ejemplo de construcción de un arreglo, amplitudes de la nota F2. ....	73
<b>Figura 4-40</b>	Selector de arreglos para valores de amplitud .....	74
<b>Figura 4-41</b>	Selector de arreglos para valores de tiempos de decaimiento .....	75
<b>Figura 4-42</b>	Selector de arreglos para valores de amortiguamiento el valor de la parte izquierda corresponde al valor del knob de amortiguamiento de usuario. ....	76
<b>Figura 4-43</b>	Detalle de calibración del valor de amortiguamiento. ....	77
<b>Figura 4-44</b>	Módulo de envolvente .....	77
<b>Figura 4-45</b>	Módulo Multi-Stage Envelope .....	78
<b>Figura 4-46</b>	Composición Interna del módulo Multi Stage Envelope.....	78
<b>Figura 4-47</b>	Submódulo Multienvolpe .....	79
<b>Figura 4-48</b>	Construcción interna del módulo envolvente. ....	80
<b>Figura 4-49</b>	Detalle de valores para los arreglos .....	80
<b>Figura 4-50</b>	Reverberación.....	81
<b>Figura 4-51</b>	Interfaz gráfica de usuario .....	82
<b>Figura 5-1</b>	Fases del procedimiento de prueba.....	83
<b>Figura 5-2</b>	Implementación del sintetizador en FL Studio.....	84
<b>Figura 5-3</b>	Notas del sintetizador grabadas. ....	84
<b>Figura 5-4</b>	Espectro en frecuencia del sintetizador vs espectro original de la nota F2 .....	85
<b>Figura 5-5</b>	Espectro en frecuencia del sintetizador vs espectro original de la nota G#2.....	85
<b>Figura 5-6</b>	Espectro en frecuencia del sintetizador vs espectro original de la nota B2.....	85
<b>Figura 5-7</b>	Espectro en frecuencia del sintetizador vs espectro original de la nota D3.....	86
<b>Figura 5-8</b>	Espectro en frecuencia del sintetizador vs espectro original de la nota F3 .....	86
<b>Figura 5-9</b>	Espectro en frecuencia del sintetizador vs espectro original de la nota G#3.....	87
<b>Figura 5-10</b>	Espectro en frecuencia del sintetizador vs espectro original de la nota B3.....	87
<b>Figura 5-11</b>	Espectro en frecuencia del sintetizador vs espectro original de la nota D4.....	87
<b>Figura 5-12</b>	Espectro en frecuencia del sintetizador vs espectro original de la nota F4 .....	88
<b>Figura 5-13</b>	Espectro en frecuencia del sintetizador vs espectro original de la nota G#4.....	88
<b>Figura 5-14</b>	Espectro en frecuencia del sintetizador vs espectro original de la nota B4.....	88
<b>Figura 5-15</b>	Envolventes original y caracterizada para el primer armónico de F2.....	89
<b>Figura 5-16</b>	Envolventes original y caracterizada para el décimo armónico de F2.....	89
<b>Figura 5-17</b>	Envolventes original y caracterizada para el primer armónico de G#3.....	90
<b>Figura 5-18</b>	Envolventes original y caracterizada para el décimo armónico de G#3.....	90
<b>Figura 5-19</b>	Envolventes original y caracterizada para el primer armónico de B4 .....	91
<b>Figura 5-20</b>	Envolventes original y caracterizada para el décimo armónico de B4: .....	91
<b>Figura 6-1</b>	Módulo para la envolvente .....	93

## Lista de tablas.

<b>Tabla 4-1</b> Proporción de los armónicos sobre la frecuencia fundamental .....	45
<b>Tabla 4-2</b> Tabla de valores de Energía (amplitud) máxima para armónicos de F2.....	63
<b>Tabla 4-3</b> Tabla de valores de constante de amortiguamiento para armónicos de F2.....	65
<b>Tabla 4-4</b> Tabla de tiempos de decaimiento para armónicos de F2 .....	66
<b>Tabla 4-5</b> Análisis de proporcionalidad para representar la amplitud de los armónicos .....	67
<b>Tabla 4-6</b> Desafinación en pitch de los armónicos .....	69

## Lista de ecuaciones.

<b>Ecuación 2-1</b> Nivel de presión sonora .....	17
<b>Ecuación 2-2</b> Nivel de potencia sonora .....	17
<b>Ecuación 2-3</b> Modelo de crecimiento exponencial.....	18
<b>Ecuación 2-4</b> Ecuación de crecimiento natural .....	18
<b>Ecuación 2-5</b> Ecuación de movimiento subamortiguado .....	19
<b>Ecuación 2-6</b> Ecuación de energía de movimiento.....	19
<b>Ecuación 2-7</b> Frecuencia de oscilación .....	19
<b>Ecuación 2-8</b> Energía de movimiento para un sistema oscilatorio subamortiguado .....	19
<b>Ecuación 2-9</b> Vida media del oscilador.....	19
<b>Ecuación 2-10</b> Relación entre la amplitud máxima y el t60.....	20
<b>Ecuación 2-11</b> Relación entre el t60 y la vida media .....	20
<b>Ecuación 2-12</b> Transformada de Fourier .....	24
<b>Ecuación 2-13</b> Transformada inversa de Fourier .....	24
<b>Ecuación 2-14</b> STFT.....	25
<b>Ecuación 2-15</b> Ventana Kaiser .....	26
<b>Ecuación 2-16</b> Curvas de Bessel .....	26
<b>Ecuación 2-17</b> Fuerza recuperadora del resorte.....	27
<b>Ecuación 2-18</b> Fuerzas del sistema masa resorte amortiguador .....	28
<b>Ecuación 2-19</b> Ecuación del sistema masa resorte .....	28
<b>Ecuación 2-20</b> Ecuación de desplazamiento para el movimiento subamortiguado.....	29
<b>Ecuación 4-1</b> Ecuación del sistema masa resorte .....	35
<b>Ecuación 4-2</b> Solución de la ecuación del sistema masa resorte .....	36
<b>Ecuación 4-3</b> Solución de la ecuación del sistema masa resorte en parte real .....	36
<b>Ecuación 4-4</b> Ecuación del circuito RLC .....	37
<b>Ecuación 4-5</b> Movimiento del oscilador.....	43
<b>Ecuación 4-6</b> Sumatoria de los armónicos .....	44
<b>Ecuación 4-7</b> Envolvente de cada armónico .....	44
<b>Ecuación 4-8</b> Amplitud decreciente .....	45
<b>Ecuación 4-9</b> Equivalencia entre Seno y Coseno .....	69
<b>Ecuación 4-10</b> Tiempo de decaimiento máximo definido por el usuario .....	74
<b>Ecuación 4-11</b> Tiempo de decaimiento mínimo definido por el usuario.....	74
<b>Ecuación 4-12</b> Tiempo de decaimiento cuando el fader se encuentra en 0 .....	74

# 1 Capítulo I: Problema de investigación

## 1.1 Planteamiento del problema

Para el modelamiento físico y matemático para síntesis de instrumentos musicales, el modelo existente para la envolvente sonora (ADSR: Attack Decay Sustain Release) modula por amplitud el sonido del instrumento para obtener la sensación sonora de incremento y atenuación del sonido (Jordá Puig, 1997). En este modelo se dibuja la envolvente con líneas rectas y cambios abruptos, en este proyecto se pretende lograr una envolvente natural de un instrumento de cuerda pulsada partiendo de su comportamiento oscilatorio y demostrar que la cuerda de la guitarra es análogo a un sistema masa-resorte en el cual cada frecuencia de resonancia (armónicos) tiene un comportamiento característico de este sistema oscilatorio, particularmente del caso subamortiguado.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo General

Modelar e implementar un VST (Virtual Studio Technology) de síntesis aditiva para una guitarra acústica usando sistemas amortiguados.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Obtener las características armónicas de una guitarra acústica (Amplitud, Frecuencia, Fase), para una sola octava, en las seis cuerdas de la guitarra.

- Parametrizar las ecuaciones de movimiento subamortiguado para obtener datos de entrada y de salida para controlar el sintetizador por amortiguación y por masa.
- Diseñar y programar una aplicación VST con el timbre del instrumento, teniendo en cuenta sus características oscilatorias, en el programa synthmaker.

### **1.3 Justificación**

Basado en la revisión bibliográfica no hay un sintetizador que tenga en cuenta el comportamiento natural del movimiento armónico amortiguado para la envolvente de instrumentos musicales, por lo tanto es necesario hacer este modelamiento y este VST para lograr que el sonido de la guitarra tenga un comportamiento natural en cuanto a su envolvente.

## **2 Capítulo II: Marco de Referencia**

### **2.1 Antecedentes**

Dentro del campo de la síntesis de instrumentos musicales, se tienen varios referentes de modelamientos matemáticos y físicos tales como:

- Modelamientos autoregresivos.
- Algoritmos de redes neuronales.
- Síntesis con algoritmo LPC (Linear Predictive Coding).
- Síntesis cruzada.
- Esquemas adaptativos paramétricos.
- Construcción digital de onda.
- Construcción fraccional de onda.
- Síntesis por transformada inversa.
- Síntesis binaural.

Estos métodos han sido aplicados para modelar instrumentos percutivos y de cuerda pulsada con el objetivo de lograr una aproximación más certera comparada con la síntesis aditiva convencional ya que se tienen en cuenta aspectos en la discretización de la señal utilizando la transformada Z y el

contenido inarmónico de la señal modelando el instrumento en un sistema con su respectiva función de transferencia.

### **2.1.1 Modelamiento por medición acústica**

Hay un modelamiento en el cual se tiene en cuenta la respuesta física del instrumento en el cual se hace una medición al instrumento tratado como si fuese un recinto acústico obteniendo la respuesta impulsiva del instrumento con una señal MLS de entrada, un sonómetro y un acelerómetro para medir los desplazamientos del instrumento. Este tipo de medición ha sido aplicada para instrumentos de cuerda frotada (violines), instrumentos de viento (trompetas) y para pianos. La aplicación de este método ha sido para comparar los diferentes subtipos de instrumentos desde una perspectiva física propia del instrumento.

## **2.2 Marco Conceptual**

### **2.2.1 Modelos para música y audio**

La construcción de modelos es una actividad fundamental humana. Un modelo puede definirse como cualquier forma de computación que predice el comportamiento de un objeto físico o basarse en un fenómeno en su estado inicial y cualquier fuerza de entrada. Una teoría físico matemática, tal como las leyes de Newton de movimiento, da un modelo matemático que inmediatamente predice el resultado de cualquier experimento físico en el mundo real para el cual la teoría es aplicable.

Para instrumentos musicales virtuales y efectos de audio, el modelo reemplaza lo real. Por lo tanto, la predicción del modelo de sus entradas (controles y posibles sonidos de entrada), es simplemente el sonido deseado de salida. En este caso específico de estudio se desea proveer entradas de un modelo desde un intérprete musical humano y el deber del modelo se convierte en retratar un sonido de alta calidad basado en gestos de interpretación. La forma del modelo computacional pertenece al campo del procesamiento digital de señales.

Los modelos físicos son deseables cuando muchas dimensiones de control de expresión se necesitan. Esto generalmente es bien apreciado para músicos intérpretes. Los miembros de la audiencia solo

escuchan el sonido final tocado, entonces ellos no están en posición de juzgar la calidad del control multidimensional así como músicos talentosos solo utilizan un subespacio de control estrecho en cualquier interpretación dada. (Sears, 1964).

### 2.2.2 Presión sonora y nivel de presión sonora

Cuando se produce un sonido, la presión del aire cambia levemente conforme avanza la onda de propagación, aumentando y disminuyendo su valor en pequeñas fracciones de segundo.

Esta diferencia instantánea de presión debida a la onda sonora se llama presión sonora.

La presión sonora tolerable es muy pequeña comparada con la presión atmosférica. Una presión sonora mil veces menor que la atmosférica provocará dolor en los oídos e incluso riesgo de pérdida auditiva. Como los valores de presión sonora pueden variar de Pa hasta mPa, para medir el nivel de presión sonora se utiliza una escala logarítmica:

$$Lp = 20 \log \frac{P_1}{P_0} \quad (2-1)$$

- $P_1$  :  $P_1$  es la presión eficaz
- $P_0$  :  $P_0$  es la presión de referencia 20  $\mu$ Pa (Kinsler, 2009).

### 2.2.3 Potencia acústica y nivel de potencia acústica

La potencia acústica es la cantidad de energía radiada por una fuente determinada. El nivel de potencia acústica es la cantidad de energía radiada en un segundo y se mide en watts. El nivel de referencia se mide en picowatts=  $1 \times 10^{-12}$ .

$$Lp = 20 \log \frac{P_1}{P_0} \quad (2-2)$$

- $P_1$  :  $P_1$  es la potencia eficaz
- $P_0$  :  $P_0$  es la potencia de referencia

### 2.2.4 Crecimiento y decrecimiento exponencial

El modelo de crecimiento exponencial está basado en que una variable crece o decrece con una rapidez proporcional a su tamaño. Este modelo es aplicado para poblaciones de bacterias o animales, la ley de Newton de Enfriamiento, la masa de radiación en una sustancia entre otras. En general si  $y(t)$  es el valor de una cantidad en el instante  $t$  y si la razón de cambio de  $y$  con respecto a  $t$  es proporcional a su tamaño  $y(t)$  en cualquier instante, entonces:

$$\frac{dy}{dt} = ky \quad (2-3)$$

Donde  $k$  es una constante. La ecuación a veces recibe el nombre de ley de crecimiento natural (si  $k > 0$ ), o si ( $k < 0$ ) se le da el nombre de decaimiento natural. Al ser una ecuación diferencial separable tiene la siguiente solución:

$$\int \frac{dy}{y} = \int k dt$$

$$\ln|y| = kt + C$$

$$|y| = e^{kt+C} = e^C e^{kt}$$

$$y = A e^{kt} \quad (2-4)$$

Donde  $A (= \pm e^C \text{ o } 0)$  es una constante arbitraria. Para ver el significado del a constante  $A$ , observamos que

$$y(0) = A e^{k \cdot 0} = A$$

Por tanto  $A$  es el valor inicial de la función.

En resumen la solución del problema con valor inicial es:

$$\frac{dy}{dt} = ky \quad y(0) = y_0$$

$$y(t) = y_0 e^{kt}$$

En física se expresa la rapidez de decaimiento en términos de la vida media, que corresponde al tiempo que se necesita para que la variable a estudiar decaiga a la mitad. (Stewart, 2006).

### 2.2.5 Decaimiento de energía para oscilaciones amortiguadas

Si se analiza el caso subamortiguado, se observa que la energía decae exponencialmente y no se conserva.

Si el desplazamiento es:

$$x(t) = Ae^{-\frac{\Gamma}{2}t} \cos(\omega t + \theta) \quad (2-5)$$

Es llevado a la expresión

$$E(t) = \frac{m\dot{x}^2}{2} + \frac{kx^2}{2} \quad (2-6)$$

Resulta:

$$E(t) = \frac{1}{2} e^{-\frac{\Gamma}{2}t} \left[ m \left( \frac{\Gamma}{2} \right)^2 A^2 \cos^2(\omega t + \theta) + m\omega\Gamma A^2 \cos(\omega t + \theta) \sin(\omega t + \theta) + m\omega^2 A^2 \sin(\omega t + \theta) + kA^2 \cos^2(\omega t + \theta) \right]$$

Si el amortiguamiento es lo suficientemente débil ( $\Gamma \ll \omega_0$ ) se pueden ignorar los dos primeros términos de () y aproximar

$$\omega^2 \approx \omega_0^2 = \frac{k}{m} \quad (2-7)$$

Teniendo en cuenta ésta aproximación la energía decae exponencialmente en el tiempo.

$$E(t) \approx \frac{1}{2} (kA^2 e^{-\Gamma t}) \approx \left( m \frac{\dot{x}^2(0)}{2} + k \frac{x^2(0)}{2} \right) e^{-\Gamma t} = E_0 e^{-\Gamma t} \quad (2-8)$$

Entonces  $E(t) = \frac{E}{2}$  cuando  $e^{-\Gamma t} = \frac{1}{2}$  esto es cuando  $\Gamma t = \ln 2$ . De esta expresión resulta el tiempo  $\tau$  necesario para que la energía decaiga a la mitad de su valor inicial es igual a:

$$\tau = \frac{\ln 2}{\Gamma} \approx \frac{1}{\Gamma} \quad (2-9) \text{ (Guerrero, 2005)}$$

### 2.2.6 Regresión exponencial

La regresión exponencial es un método que permite encontrar la ecuación de la función exponencial que mejor se ajuste a un grupo de datos y de esta manera poder estimar valores futuros de su variable.

Los datos deben tener un patrón de crecimiento o decrecimiento exponencial, además, la ecuación que rige este tipo de curva es  $y = ae^{bx}$ , donde  $x$  es el valor de la variable independiente y  $y$  el de

la variable dependiente,  $e$  es el número de Euler (2.7182) aproximadamente. Para una función exponencial decreciente, el valor de  $a$  es donde  $a$  corta con el eje  $y$ , y  $b$  es un valor negativo que caracteriza la función exponencial. (Excel Free Blog, 2015)

### 2.2.7 Audio decay time

En audio un decay de  $1/e$  no es suficiente para ser inaudible, a menos que la amplitud sea extremadamente pequeña. En acústica arquitectónica, la medida mas común para el decay es el  $t_{60}$ , el cual es definido como el tiempo para que la amplitud caiga 60db (Smith 5.2, 2011). El  $t_{60}$  se obtiene resolviendo la ecuación:

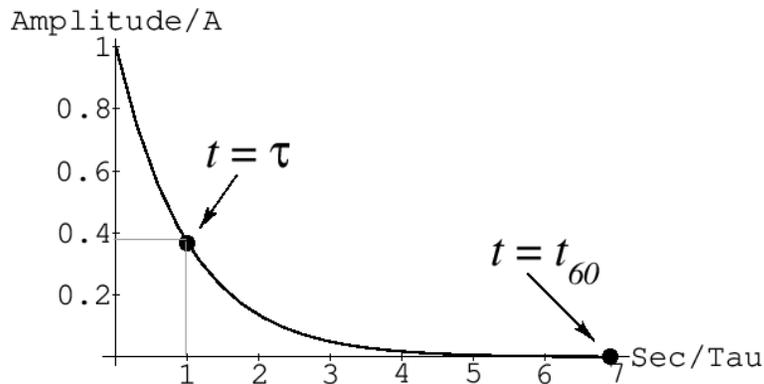
$$\frac{a(t_{60})}{a(0)} = 10^{-60/20} = 0.001 \quad (2-10)$$

Usando la definición de la exponencial  $a(t) = Ae^{-t/\tau}$  entonces:

$$t_{60} = \ln(1000)\tau \approx 6.91\tau \quad (2-11)$$

Para una Amplitud inicial  $a(0)=1$ , el tiempo de decaimiento puede representarse como:

**Figura 2-1** Imagen del decaimiento de la amplitud de una función exponencial



Tomado de: <https://ccrma.stanford.edu/~jos/mdft/Exponentials.html>

### 2.2.8 MIDI

La palabra MIDI hace referencia (por sus siglas en inglés) a *Musical Instrument Digital Interface*. MIDI es un protocolo de comunicación estandarizado que permite a los computadores, sintetizadores, controladores, entre otros dispositivos musicales electrónicos, comunicarse entre sí para la generación

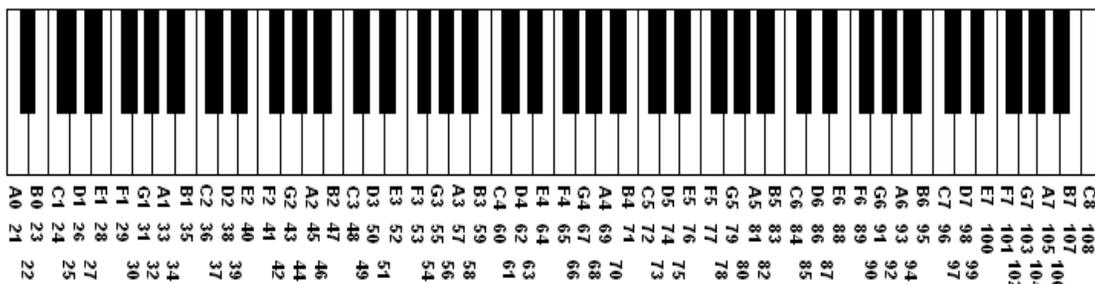
de sonidos. Toda la comunicación MIDI se realiza a través de mensajes multi-byte que consisten en un byte de estado seguido por uno o dos bytes de datos.

### 2.2.9 Note Pitch

El pitch representa la percepción de la frecuencia de un sonido. Es uno de los principales atributos de los tonos musicales, junto con la duración, intensidad, timbre y localización de la fuente de sonido. El pitch se compara con "superior" e "inferior" en el sentido que permite la construcción de melodías. El tono puede ser cuantificado como la frecuencia en ciclos por segundo (hercios), sin embargo en la música no es una propiedad objetiva física, pero si una propiedad subjetiva psicoacústica como atributo de sonido. (Interfaz Música, 2011)

Para el protocolo MIDI, cada nota musical tiene un valor de pitch asignado.

**Figura 2-2** Conversión de nota musical a valor de pitch en MIDI



Tomado de: <http://www.sengpielaudio.com/calculator-notenames.htm>

### 2.2.10 Plug-in

Un plug-in es un módulo digital que permite modificar, controlar y automatizar procesos de una señal de audio, éste añade características específicas al software de edición. Es un componente que se incorpora a un sistema ya existente y por lo tanto depende de este para su correcta ejecución y funcionamiento. Existen tres tipos de dispositivos básicos que se trabajan en los software de audio digital. Estos son: *Soft Synths*, *Soft Samplers* y *Software Processors*, conocidos como *plug-ins*. (Tweakheads)

### **2.2.11 VST**

Siglas de *Virtual studio technology*. VST son herramientas que permiten conectar entre si efectos de audio e instrumentos virtuales.

La tecnología que emplean los plugins VST utilizan el procesamiento digital de señal (DSP) para la simulación por *software* del sonido, el comportamiento y la operación de los equipos *hardware* que se usan tradicionalmente en un estudio de grabación. (Future Music, 2010)

### **2.2.12 DSP**

En inglés *Digital signal processing* o procesamiento digital de señales es la manipulación matemática de una señal digital. Cuando se refiere al procesado digital de señales, se refiere a la representación mediante secuencias de números de precisión finita y el procesado se realiza utilizando un computador digital. (Carlos Platero 2010)

### **2.2.13 Síntesis de modelos físicos**

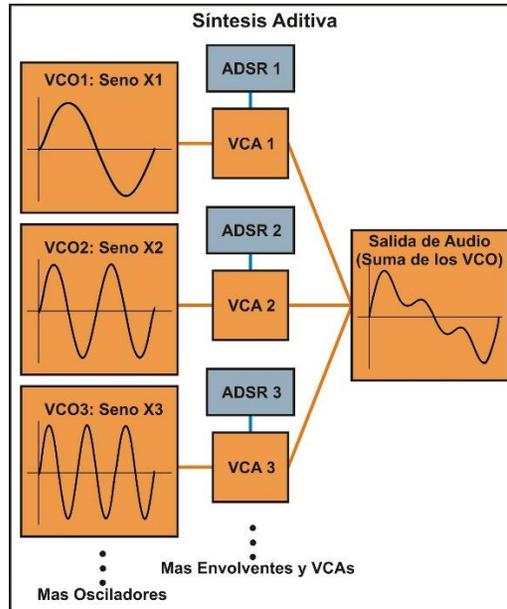
Dentro del modelado físico existen distintos métodos, los cuales pueden clasificarse dentro de dos posibles técnicas existentes: técnicas de dominio temporal y técnicas de descomposición modal. Dentro de las primeras pueden nombrarse los métodos de Digital Waveguide, Finite Difference Time Domain, Wave Digital Filter y el modelado mixto. El segundo grupo está compuesto por los métodos de Síntesis Modal y Functional Transformation Method (FTM). En la actualidad el método más importante de los mencionados anteriormente es el de guía de ondas digital. (Cristian García Bauza, Pablo Lotito, Lisandro Parente, Marcelo Vénere, 2009)

### **2.2.14 Síntesis aditiva**

La síntesis aditiva es uno de los primeros métodos utilizados para la obtención de espectros sonoros ricos que se aproximan al comportamiento natural de los sonidos. El análisis acústico de las señales de audio nos enseña que los sonidos naturales están, de hecho, compuestos de una multitud de

componentes simples, las cuales, en el caso de los sonidos periódicos con una altura determinada, tienen una frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental. (Emilia Gómez, 2009)

**Figura 2-3** Diagrama en bloques de la síntesis aditiva.



Tomado de: [http://2.bp.blogspot.com/-](http://2.bp.blogspot.com/-cDn1uHbf8SY/T0hRLsl0MSI/AAAAAAAAAEk/QKhr88p2J80/s1600/Sintesis+Aditiva.jpg)

[cDn1uHbf8SY/T0hRLsl0MSI/AAAAAAAAAEk/QKhr88p2J80/s1600/Sintesis+Aditiva.jpg](http://2.bp.blogspot.com/-cDn1uHbf8SY/T0hRLsl0MSI/AAAAAAAAAEk/QKhr88p2J80/s1600/Sintesis+Aditiva.jpg)

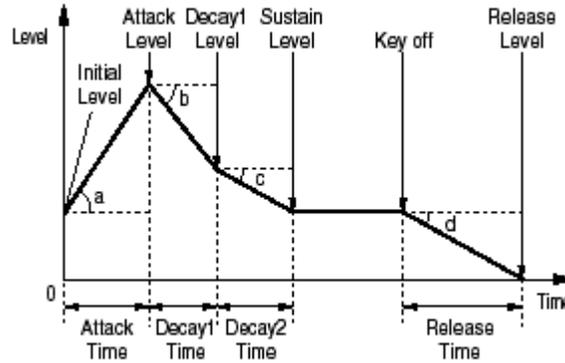
### 2.2.15 Modulación de la envolvente acústica para sintetizadores

En los instrumentos acústicos, el nivel sonoro varía permanentemente a lo largo de la emisión de una nota, y la forma en que lo hace influye poderosamente en su carácter. La envolvente más precisa corresponde a la línea que une los sucesivos máximos de amplitud, pero, para simplificar el procesado de la información, la mayoría de sintetizadores reducen la envolvente a unos pocos fragmentos rectilíneos.

Periodos de la envolvente:

1. El tiempo transcurrido entre el inicio de un sonido y el instante en que éste alcanza su nivel máximo, se denomina ataque.
2. El tiempo del primer descenso recibe el nombre de decaimiento.
3. El nivel al que se mantiene la amplitud, después de este decaimiento, se llama sostenido.
4. Finalmente, el tiempo empleado por el sonido en extinguirse hasta el silencio, se llama liberación o Release. (Jordá Puig, 1997)

**Figura 2-4** Envolverte acústica de instrumentos musicales



Tomado de: <https://warmsoundblog.files.wordpress.com/2015/12/0206.gif?w=640>

### 2.2.16 FT (Fourier Transform)

Una transformada de Fourier es una operación matemática que transforma una señal de *dominio de tiempo* a *dominio de frecuencia* y viceversa. En el dominio de tiempo, la señal se expresa con respecto al tiempo. En el dominio de frecuencia, una señal es expresada con respecto a la frecuencia. (Native Instruments). La transformada de Fourier de una señal  $x(t) \in \mathbb{C}, t \in (-\infty, \infty)$ , está definida como

$$X(\omega) \triangleq \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2-12)$$

Y su inversa está definida como:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (2-13)$$

Así, la transformada de Fourier está definida para frecuencia continua y para tiempo continuo, ambas sin límite.

### 2.2.17 STFT (Short-Time Fourier Transform)

La Transformada de Fourier es una herramienta bastante exitosa en el análisis de señales estacionarias. Sin embargo, ésta no puede ser aplicada con el fin de obtener información precisa cuando las diferentes componentes en el dominio de la frecuencia hacen su aparición en la señal, como es el caso de las señales no estacionarias cuyo contenido espectral varía con el tiempo. Para resolver el problema de resolución en tiempo de la transformada de Fourier, Denis Gabor (1946) adaptó la transformada utilizando un procedimiento llamado ventaneado. Este procedimiento consiste en dividir una señal  $x(t)$  en pequeños segmentos a través del tiempo de forma que se pueda asumir que para cada segmento la señal es estacionaria y así calcular la Transformada de Fourier en cada uno de ellos. La forma de dividir la señal se realiza mediante lo que se denomina una ventana temporal  $g(t)$ , cuyo ancho corresponde a la longitud del segmento o tramo en los que se divide la señal total.

La STFT es el método clásico de análisis tiempo-frecuencia. El concepto principal de esta transformada es multiplicar la señal  $s(t)$ , a ser analizada, por una ventana de análisis  $g(\tau - t)$ , y luego se calcula la transformada de Fourier de la señal ventaneada de acuerdo con:

$$T_{STFT}(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) g(\tau - t) e^{-j2\pi\tau f} d\tau \quad (2-14)$$

La STFT es una herramienta general multipropósito para el procesamiento de la señal de audio. Define clases particulares de distribuciones de tiempo-frecuencia, las cuales especifican la amplitud compleja versus tiempo y frecuencia para cualquier señal. Hay dos parámetros que definen la STFT para las aplicaciones en audio:

1. Aproximar el análisis de tiempo-frecuencia dado por el oído para propósitos de gráfica espectral.
2. Medir parámetros para modelamiento en un espectro de tiempo corto.

En el primer caso, las aplicaciones para graficar audio espectral van mas allá de mirar el espectro. También proveen una base para el procesamiento de señal da audio intentando imitar la percepción humana, como el reconocimiento de escena de auditorio o transcripción automática para música.

Ejemplos del segundo caso incluyen estimar el tiempo de decaimiento versus la frecuencia para cuerdas vibrantes y resonancias del cuerpo o medir lo más precisamente posible la frecuencia fundamental de una señal periódica basado en rastrear sus armónicos en la STFT. (Julius Smith, cap 8.1, 2011)

### 2.2.18 Ventanas

Una ventana minimiza los efectos de realizar una FFT sobre un número no entero de ciclos al usar una técnica llamada funciones ventana. Las ventanas reducen la amplitud de las discontinuidades en los límites de cada secuencia finita adquirida por el digitalizador. Consisten en multiplicar el registro de tiempo por una ventana de longitud finita con una amplitud que varía poco a poco hacia cero en los bordes. Esto hace que los extremos de la forma de onda se encuentren y por lo tanto, da como resultado una forma de onda continua y sin transiciones bruscas. Esta técnica también se conoce como aplicar una ventana. (Native instruments)

### 2.2.19 Ventana Kaiser

Jim Kaiser descubrió una aproximación para ventanas basado en las funciones de Bessel, generalmente conocido como la ventana Kaiser (o ventana Kaiser-Bessel).

$$w_k(n) \triangleq \begin{cases} \frac{I_0(\beta) \sqrt{1 - \left(\frac{n}{M/2}\right)^2}}{I_0(\beta)}, & -\frac{M-1}{2} \leq n \leq \frac{M-1}{2} \\ 0, & \text{Para el resto} \end{cases} \quad (2-15)$$

Donde  $I_0$  es la función de Bessel de primer tipo de orden 0;  $\beta$  es un número real arbitrario que determina la forma de la ventana y  $n$  es un número natural que marca el orden de la ventana (Smith, 2011).

$$I_0 \triangleq \sum_{k=0}^{\infty} \left[ \frac{\left(\frac{x}{2}\right)^k}{k!} \right]^2 \quad (2-16)$$

Cuando  $\beta=0$  la ventana se reduce a rectangular, a veces la ventana Kaiser puede ser parametrizada por  $\alpha$ , donde:

$$\beta \triangleq \pi\alpha$$

### 2.2.20 Movimiento Oscilatorio

Se dice que el movimiento de un cuerpo es oscilatorio cuando efectúa desplazamientos en uno y otro sentido alrededor de cierto punto fijo. Movimientos de esta clase son: el de un cuerpo suspendido de un resorte, el de un péndulo oscilando con pequeña amplitud y el del balancín de un reloj. Las vibraciones de las cuerdas y columnas de aire de los instrumentos musicales son armónicas o bien de superposición de movimientos armónicos. (Física, Sears, Zemansky, 1964)

### 2.2.21 Fuerzas recuperadoras elásticas

Cuando se obliga a un cuerpo a cambiar de forma, la fuerza deformadora es proporcional a la deformación, siempre que no se sobrepase el límite de la proporcionalidad. La variación puede consistir en un aumento de longitud, como en el caso de una banda de goma o de un resorte en hélice; en una disminución; en una flexión, si se trata de un resorte plano; en la torsión de una barra alrededor de su eje, o en muchas otras formas. La expresión fuerza deformadora se interpreta en un sentido amplio y puede referirse a una fuerza, a un par, a una presión o a cualquier otra cosa capaz de producir la deformación. Si restringimos el estudio al de una tracción o un empuje, en cuyo caso la deformación es simplemente el desplazamiento del punto de aplicación de la fuerza, esta y el desplazamiento están relacionados por la ley de Hooke:

$$F = kx \quad (2-17)$$

Siendo  $k$  una constante de proporcionalidad llamada constante recuperadora, y  $x$  el desplazamiento, contado a partir de la posición de equilibrio.

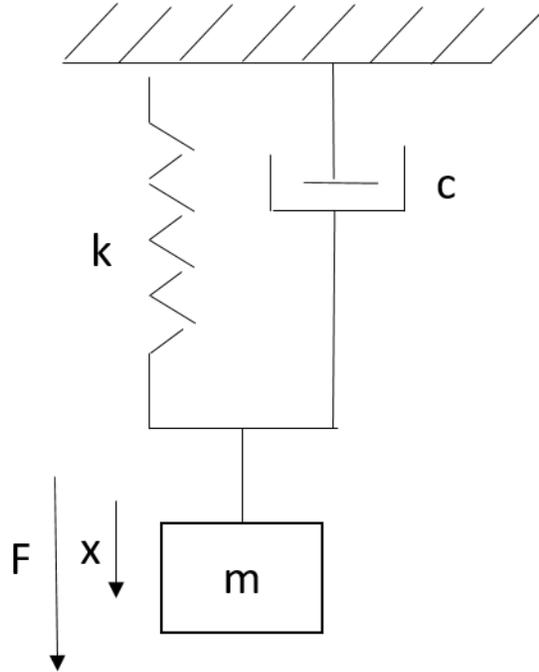
En esta ecuación,  $F$  representa la fuerza que hay que ejercer sobre un cuerpo elástico para producir el desplazamiento  $x$ . La fuerza efectuada en sentido contrario por el cuerpo elástico sobre el objeto al cual está unido se denomina fuerza recuperadora y es igual a  $-kx$ . (Física, Sears, Zemansky, 1964)

### 2.2.22 Sistemas oscilatorios amortiguados

Es un sistema (mecánico, eléctrico, acústico, neumático) donde la masa ( $m$ ) oscila hasta encontrar la posición de equilibrio y el movimiento es atenuado por la constante de amortiguación ( $c$ ) y su posición se caracteriza por la constante del resorte ( $k$ ).

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = f(t) \quad (2-18)$$

**Figura 2-5** Sistema masa-resorte-amortiguador



*Fuente: Imagen Original*

La ecuación del movimiento se expresa en forma de ecuación diferencial, teniendo en cuenta que la aceleración es la derivada segunda de la posición  $x$ , y la velocidad es la derivada primera de  $x$ .

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\gamma \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0 \quad \text{donde} \quad \omega_0^2 = \frac{k}{m} \quad \text{y} \quad 2\gamma = \frac{c}{m} \quad (2-19)$$

$\omega_0$  es la frecuencia natural del oscilador

$\gamma$  es la constante de amortiguamiento

Los tres casos resultantes para el oscilador amortiguado son:

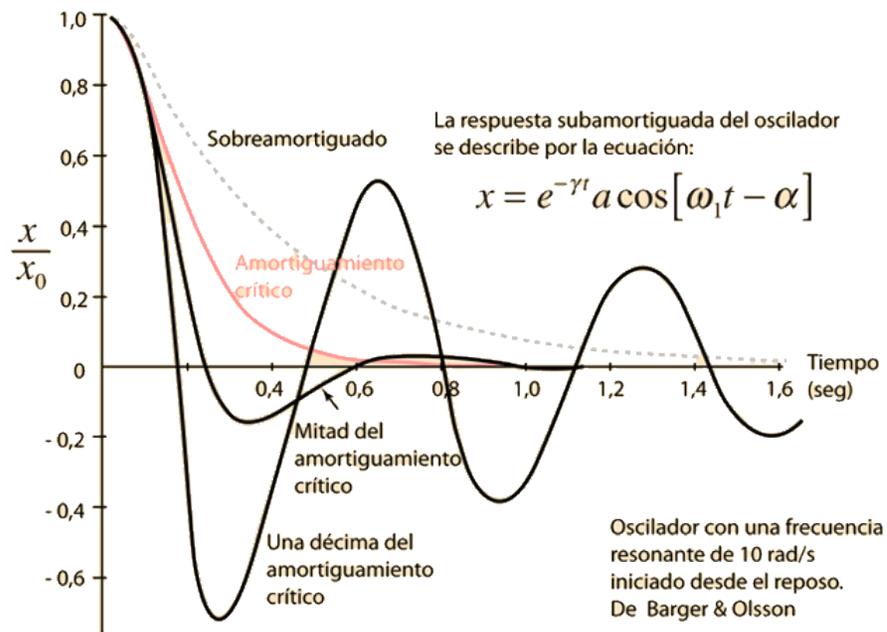
$c^2 - 4mk > 0$  Caso Sobreamortiguado

$c^2 - mk = 0$  Amortiguamiento crítico

$c^2 - mk < 0$  Caso Subamortiguado

### 2.2.23 Caso Subamortiguado

**Figura 2-6** Oscilador subamortiguado



Tomado de: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/oscda.html#c2>

La respuesta subamortiguada del oscilador se describe por la ecuación:

$$x = e^{-\gamma t} a \cos(\omega t - \alpha) \quad (2-20)$$

Donde  $e^{-\gamma t}$  es el componente que modula el movimiento para que se atenúe hasta llegar a la posición de equilibrio. La energía de la partícula que describe una oscilación amortiguada es la suma de la energía cinética de la partícula y de la energía potencial del muelle elástico deformado.

(Hyperphysics, 2010).

### **2.2.24 Matlab**

Es un lenguaje de alto nivel y entorno interactivo para computación numérica, visualización y programación. Usando Matlab, se pueden analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos y aplicaciones. Matlab tiene un amplio rango de aplicaciones, incluyendo procesamiento de señales y comunicaciones, procesamiento de imagen y video, sistemas de control, pruebas, mediciones, computación financiera y biología computacional. (Matlab Product Description)

### **2.2.25 Flowstone**

Flowstone es un lenguaje de programación gráfico para el rápido desarrollo de aplicaciones de software. Se pueden agregar controles personalizados para modificar parámetros en tiempo real y agrupar éstos controles para crear interfaces gráficas poderosas.

Las creaciones completas pueden ser exportadas como aplicaciones ejecutables completamente independientes o plug ins de audio. Estas aplicaciones pueden ser usadas en cualquier PC con Microsoft Windows o usadas en el centro de su propio sistema embebido. (Flowstone User Guide)

### **2.2.26 Lenguaje Ruby**

Ruby es un lenguaje de programación creado por Yukihiro “Matz” Matsumoto que mezcla elementos de varios lenguajes de programación como Perl, Smalltalk, Eiffel, Ada y Lisp. Ruby es un lenguaje de programación de distribución libre y gratuita en su uso, copia, modificación y distribución. (Acerca de Ruby)

## **3 Capítulo III: Diseño Metodológico**

### **3.1 Enfoque y tipo de investigación**

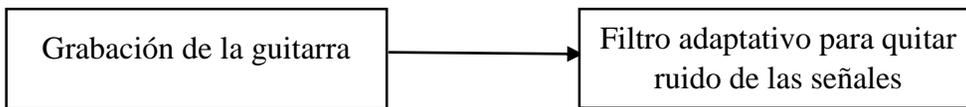
El enfoque para este caso es empírico-analítico, ya que en este método se interviene sobre el objeto de estudio modificando a éste directa o indirectamente para crear las condiciones necesarias que permitan revelar sus características fundamentales y sus relaciones esenciales.

Para este caso el objeto de estudio es una guitarra acústica, se estudiará una grabación de este instrumento para hacer un modelamiento matemático y computacional de éste, teniendo en cuenta las características del sonido y condiciones en las que se obtuvo. El tipo de investigación es experimental ya que se pretende replicar el sonido de la guitarra a través de un sintetizador y observar el grado en el que el contenido armónico y la variable de amortiguamiento influyen en el diseño del sintetizador.

Fases de la investigación:

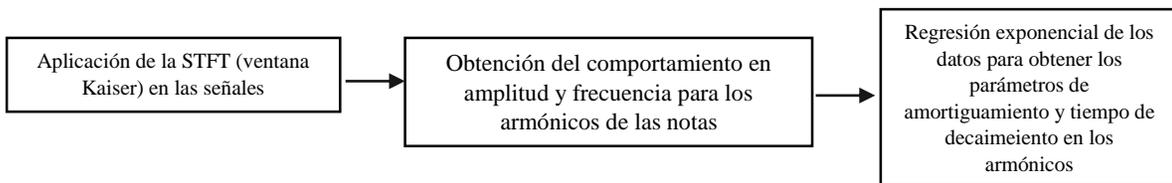
A. Obtención del sonido de la guitarra

**Figura 3-1** Fases para la obtención del sonido de la guitarra.



B. Obtención de los parámetros para las ecuaciones a partir del sonido hallado.

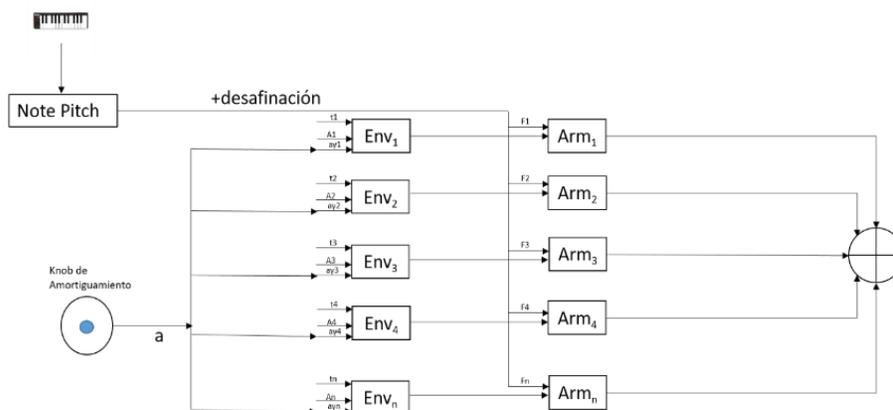
**Figura 3-2** Fases para la obtención de los parámetros de las ecuaciones



C. Programación del sintetizador

Se desarrollará un sintetizador en la plataforma Flowstone con los parámetros hallados.

**Figura 3-3** Diagrama en bloques del sintetizador.



*Fuente: Imagen Original*

t: Tiempo de decaimiento.

A: Amplitud

$\gamma$ : Constante de amortiguación.

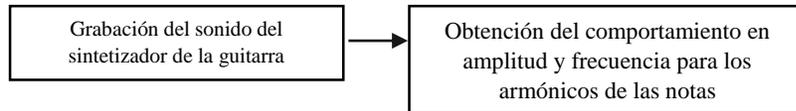
a: Amortiguamiento del usuario

Env: Envolvente

Arm: Armónico

D. Extracción de los resultados

**Figura 3-4** Fases para la extracción de resultados.



E. Comparación de resultados con el sonido original de la guitarra.

Comparación de las características armónicas del sonido original y el sonido del sintetizador.

## 3.2 Recopilación de datos

Se grabaron 12 notas en las 6 cuerdas de la guitarra, desde la nota suelta hasta el traste 11. Para no sobrecargar computacionalmente el programa en flowstone se utilizaron 12 notas, los valores hallados para cada nota se extrapolan a los dos semitonos siguientes. La grabación se realizó en la Sala de Mastering de la Universidad San Buenaventura.

Se tomaron las notas F2 (87 hz), G#2 (103 hz) , B2(123.47 hz), D3(146.83 hz), F3(174.61 hz), G#3(207.65 hz), B3(246.94 hz), D4(293.66 hz), F4(349.23hz ) , G#4(415.3 hz), B4(493.88 hz) y D5(587.33 hz).

Para obtener la amplitud, las constantes de amortiguamiento y el tiempo de decaimiento del sintetizador se utilizaron la herramienta computacional matlab utilizando la STFT y el método de regresión exponencial. (Ver desarrollo ingenieril).

### 3.3 Variables o categorías de análisis

Variables presentes en la investigación:

Amortiguamiento propio de los armónicos: Ésta variable es hallada a través del software Matlab, se obtiene con la regresión exponencial sobre los picos máximos de la gráfica de cada armónico, teniendo en cuenta la ecuación de movimiento subamortiguado (ver ecuación 2-15)

Amortiguamiento del usuario: Ésta es una variable de entrada definida por el usuario, el valor de éste varía de -20 a 20 y es controlada por un knob presente en la interfaz gráfica para el usuario, define el porcentaje de amortiguación y de tiempo de decaimiento para el sonido final de cada nota donde el 0 corresponde a la señal sin modificar, -20 corresponde al tiempo de decaimiento y coeficiente de amortiguación reducidos al 20 por ciento y 20 corresponde al tiempo de decaimiento y coeficiente de amortiguación aumentados al 20 por ciento, respetando la proporción de los amortiguamientos y tiempos de decaimiento de cada armónico en la nota.

Tiempo de decaimiento: Es el tiempo en el que la energía del armónico deja de ser audible, para el sintetizador se utilizó el criterio del tiempo de decaimiento  $t_{60}$  (ver marco teórico).

Amplitud: Es el valor energético máximo de cada armónico hallado en el Matlab.

Frecuencias armónicas: Son los múltiplos de la frecuencia fundamental, para el sintetizador se utilizaron 10 armónicos.

Sonido dado por la sumatoria: Es el sonido final dado por la sumatoria de todos los armónicos.

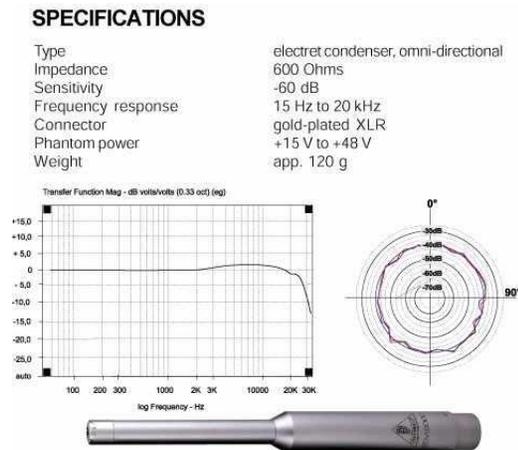
Sonido final: Es el sonido que ofrece el sintetizador al ser procesado por un compresor, ya que la sumatoria de los armónicos hace que en algunas notas se presentan picos que saturan el sonido del sintetizador.

### 3.4 Instrumentos

Los instrumentos utilizados para la grabación fueron los siguientes:

Micrófono Behringer ECM 8000

**Figura 3-4** Especificaciones e imagen del Micrófono ECM 8000



Tomado de [http://www.sonicstorm.com/pics/flat\\_ecm8000-1.jpg](http://www.sonicstorm.com/pics/flat_ecm8000-1.jpg)

**Figura 3-5** Interfaz RME FIREFACE 400



Tomado de: <http://ixbtlabs.com/articles2/proaudio/rme-fireface400-page1.html>

La grabación se hizo en el estudio de mastering de la Universidad San Buenaventura con una guitarra acústica tipo Parlor

## 4 Capítulo IV: Desarrollo Ingenieril

Para llevar a cabo este proyecto se desarrollaron dos grandes etapas de programación en dos lenguajes de programación diferentes, la primera etapa que consiste en hallar las características armónicas y oscilatorias del sonido grabado del instrumento se desarrolló en la plataforma Matlab, el cual es un entorno de programación matemático que se escogió para desarrollar ésta etapa porque permite realizar de manera precisa y detallada el análisis necesario de las señales de audio, donde a partir de la señal grabada, filtrada y normalizada de una guitarra acústica (ver sección 4-1) se halló el

comportamiento oscilatorio de cada uno de sus armónicos y los parámetros necesarios para representar la señal en la segunda etapa de programación. Teniendo en cuenta que se tomó el comportamiento oscilatorio de la frecuencia fundamental y de sus 10 primeros armónicos para que éstos sean análogos a un sistema oscilatorio subamortiguado, la señal grabada puede representarse matemáticamente como la sumatoria de sus armónicos (sección 4-2).

Partiendo de la ecuación 2-18 que modela el movimiento oscilatorio de un sistema masa resorte amortiguador:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = f(t)$$

Donde el primer sumando describe la fuerza dada por la aceleración gravitacional del cuerpo y se modela como la multiplicación entre la masa y la segunda derivada del desplazamiento  $x$  con respecto al tiempo, el segundo sumando corresponde a la fuerza que se opone al desplazamiento del resorte debido al amortiguador, ésta fuerza se modela como la multiplicación entre la primera derivada del desplazamiento con respecto al tiempo (velocidad del cuerpo) y la constante de fricción del amortiguador ( $c$ ), el tercer sumando corresponde a la fuerza recuperadora dada por la constante del resorte, se modela como la multiplicación entre la constante del resorte ( $k$ ) y el desplazamiento inicial del resorte. La fuerza  $f(t)$  en la ecuación corresponde a la fuerza externa aplicada al sistema, partiendo del hecho que en la grabación de la guitarra se soltó la cuerda desde una posición inicial sin aplicar una fuerza externa, el valor de ésta fuerza es 0. Para dejar la ecuación en términos de la frecuencia de oscilación del sistema y una constante de amortiguamiento tenemos:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\gamma \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0 \quad (4-1) \quad \text{donde} \quad \omega_0^2 = \frac{k}{m} \quad \text{y} \quad 2\gamma = \frac{c}{m}$$

La frecuencia  $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$  equivale a la frecuencia natural del oscilador, éste valor es el que se va a modelar en el sintetizador cómo la frecuencia de oscilación para cada armónico. Ésta ecuación está en forma de una ecuación diferencial homogénea de segundo orden y tiene solución de la forma (Wiki Universidad de Sevilla):

$$x = e^{\lambda t}$$

Sustituyendo en la fórmula de la ecuación:

$$m\lambda^2 + c\lambda + k = 0$$

Las raíces de la ecuación auxiliar cuadrática son:

$$\lambda = \frac{-c \pm \sqrt{c^2 - 4mk}}{2m}$$

Para dejarlo en términos de la frecuencia de oscilación y la constante de amortiguamiento las dos soluciones son:

$$\lambda_1 = -\beta + \sqrt{\beta^2 - \omega_0^2} \quad \lambda_2 = -\beta - \sqrt{\beta^2 - \omega_0^2} \quad (4-2)$$

Dependiendo del valor de la constante de amortiguamiento hay 3 posibilidades en la solución:

Si  $\beta > \omega_0$  hay dos soluciones, son reales y diferentes. (Caso sobreamortiguado).

Si  $\beta = \omega_0$  existe una solución real doble. (Amortiguamiento crítico).

Si  $\beta < \omega_0$  las dos soluciones son complejas conjugadas. (Caso subamortiguado).

El caso de estudio específico para esta investigación es el caso subamortiguado, cuando  $\beta < \omega_0$ , el amortiguamiento es débil, es decir que el sistema oscila armónicamente con una frecuencia de oscilación  $\omega_0$  atenuando su amplitud hasta la posición de equilibrio. Si llamamos  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$  podemos escribir las dos soluciones de la ecuación de segundo grado como complejos conjugados:

$$\lambda_1 = -\beta + j\omega \quad \lambda_2 = -\beta - j\omega$$

Siendo  $j = \sqrt{-1}$  la unidad imaginaria. La solución general de la ecuación diferencial queda entonces:

$$x(t) = c_1 e^{(-\beta + j\omega)t} + c_2 e^{(-\beta - j\omega)t}$$

Aquí podemos extraer como factor común la parte real de la función exponencial y escribir:

$$x(t) = e^{-\beta t} (c_1 e^{j\omega t} + c_2 e^{-j\omega t})$$

Para ver que esta solución representa soluciones amortiguadas se aplica la fórmula de Euler:

$$e^{j\omega t} = \cos(\omega t) + j \operatorname{sen}(\omega t)$$

Que transforma la solución en:

$$x(t) = e^{-\beta t} (b_1 \cos(\omega t) + b_2 \operatorname{sen}(\omega t)) \quad (4-3)$$

Con:

$$b_1 = c_1 + c_2 \quad b_2 = j(c_1 - c_2)$$

Esta combinación entre senos y cosenos se puede reducir a uno solo, como se hace el caso del oscilador sin rozamiento y escribir la solución de la forma:

$$x(t) = A_0 e^{-\gamma t} \cos(\omega t - \alpha)$$

Podemos leer esta como una ecuación sinusoidal:

$$x(t) = A(t) \cos(\omega t - \alpha)$$

Con una amplitud que decae exponencialmente:

$$A(t) = A_0 e^{-\gamma t}$$

Basado en el análisis sobre el comportamiento energético para éste tipo de sistema (Alicia Guerrero, p14, 2005), se puede afirmar que la energía de un sistema oscilatorio subamortiguado, al igual que su amplitud, también decrece exponencialmente según la ecuación 2-8.

Para hacer matemáticamente equivalente el comportamiento energético de los armónicos del sonido de una guitarra al comportamiento energético de un sistema oscilatorio subamortiguado, se halló el contenido energético de la señal para éstos armónicos utilizando la función *spectrogram* (sección 4-2) en la plataforma Matlab, la cual utiliza el algoritmo de la STFT (Short Time Fourier Transform) que consiste en hallar el contenido energético de una señal para instantes de tiempo (ventanas) y frecuencias definidos.

Muchos sistemas oscilatorios son matemáticamente equivalentes a sus correspondientes sistemas eléctricos (Kinsler, 2009). Por ejemplo, si se considera un simple circuito eléctrico en serie con una inductancia L, resistencia R y capacitancia C alimentado por una fuente de voltaje  $V \cos(\omega t)$  (Ver figura 4.1). La ecuación diferencial para la corriente  $I = dq/dt$ , donde q es la carga compleja es:

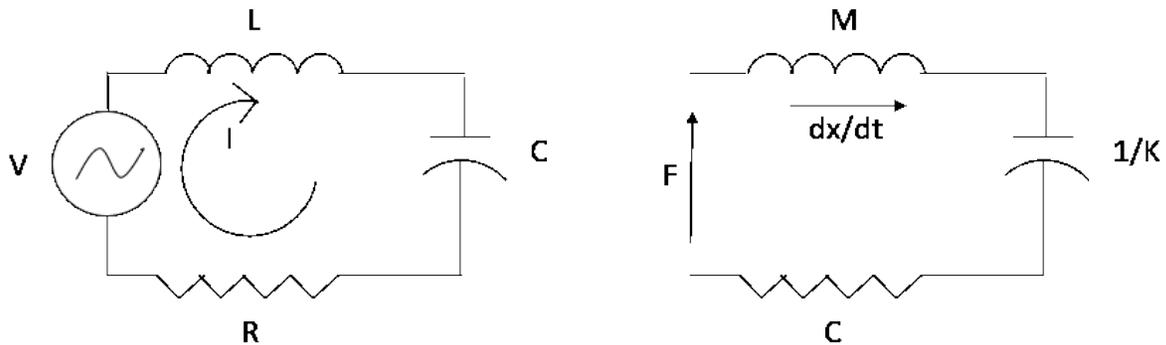
$$L \frac{dI}{dt} + RI + \frac{q}{c} = V$$

Con  $V = V_p e^{-j\omega t}$ . Esta ecuación puede ser descrita cómo:

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{c} = V \quad (4-4)$$

La cual tiene la misma forma de (ecuación de movimiento amortiguado), por lo tanto un sistema masa-resorte se puede modelar como un circuito eléctrico de la siguiente manera:

**Figura 4-1** Circuitos eléctricos análogos entre variables físicas y variables eléctricas



*Fuente: Imagen Original*

En este proyecto se hará matemáticamente equivalente la ecuación exponencial decreciente que modela el movimiento oscilatorio subamortiguado con la ecuación exponencial decreciente que modela la envolvente de cada armónico en el sonido de la guitarra.

Se analizaron las grabaciones de las notas F2, G#2, B2, D3, F3, G#3, B3, D4, F4, G#4, B4 y D5 ya que el rango tonal de una guitarra corresponde al de 3 octavas partiendo desde la nota F2 y una de las funciones del programa a desarrollar es la extrapolación de las dos notas siguientes a partir de una, caracterizando así 3 notas por cada sonido modelado, se tomó esta decisión ya que caracterizar las 36 notas correspondientes a 3 octavas en un sintetizador sería una carga computacional grande para la plataforma donde se desarrolla el Plug-in.

La segunda etapa de programación consiste en construir un sintetizador a partir de los parámetros hallados en el análisis de la señal, la plataforma escogida para construirlo fue Flowstone que permite construir programas que se pueden exportar a formato VST y ser utilizados en DAWs, Flowstone es una plataforma que basa la programación en la utilización de cadenas de módulos, si algún elemento de ésta cadena de módulos no funciona, todo la cadena deja de ser funcional, para las variables, Flowstone utiliza un código de colores donde el verde representa valores numéricos, el azul representa señales de audio, el rosa representa señales MIDI, el blanco representa secuencias de datos (streams) y el verde con contorno amarillo representa variables para mapas de bits.

Los tipos de variable utilizados en el programa fueron los siguientes:

: Flotante

: Entero

: Arreglo de números flotantes

: Señal de audio

: Señal Midi

: Flujo de datos

: Vista de mapa de bits.

El módulo principal para el diseño del VSTi en Flowstone contiene la interfaz gráfica de usuario y en su interior posee la cadena de módulos, para exportar el programa a formato VSTi se utilizó el módulo MIDI In y para asignar las entradas de usuario del sintetizador y el módulo DS Out para asignar la señal de audio resultante del Plug-In a la salida de altavoces, todo el desarrollo del plug-in se explica en la sección 4-3.

**Figura 4-2** Módulo principal del sintetizador.



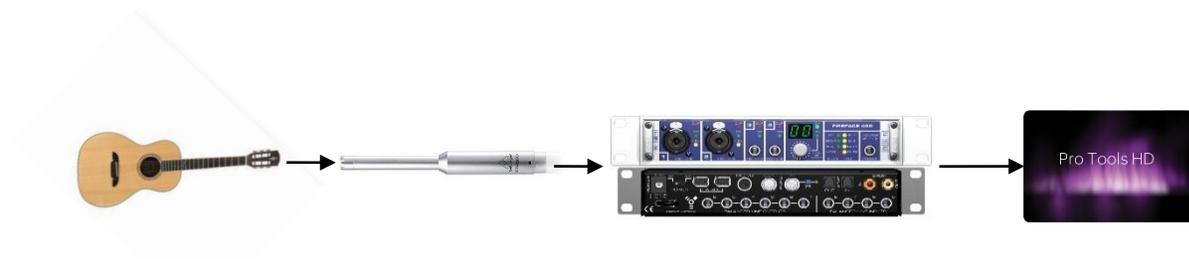
*Fuente Imagen original*

## 4.1 Obtención de la señal de la guitarra

### 4.1.1 Grabación del instrumento.

La grabación se realizó con un micrófono Behringer ECM 8000, el cual con su patrón polar omnidireccional, permitió capturar el sonido de la boca de la guitarra. Al ser un micrófono de condensador con una notable sensibilidad en frecuencias altas se obtiene una muy buena caracterización armónica del instrumento. (Ver figura 3-5)

**Figura 4-3** Flujo de señal de la grabación

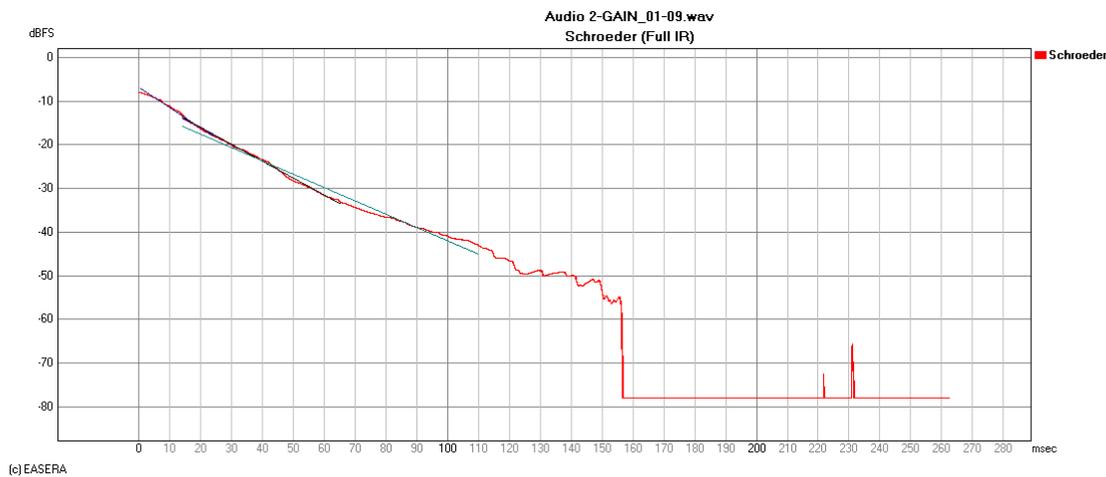
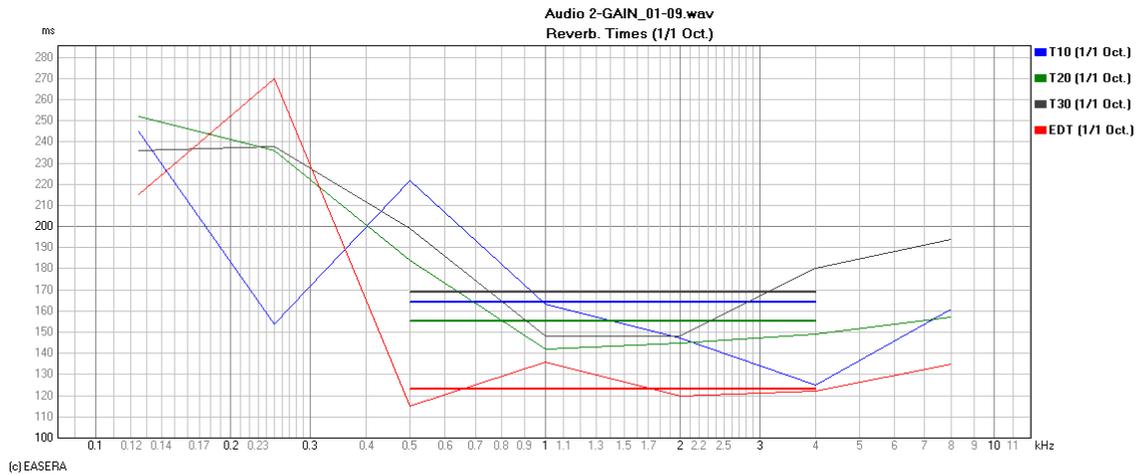


*Fuente: Imagen Original*

La boca de la guitarra es el punto donde se captura el sonido con mayor caracterización de armónicos del instrumento (*Microphone book, acústica de instrumentos musicales*). Por lo tanto se toma éste punto para hacer la captura del sonido del instrumento. La conversión análoga a digital de la grabación se hizo bajo una resolución de 44.1 kHz y un bit depth de 16 bits. Teniendo en cuenta que el sonido de la guitarra que se tomará como objeto de estudio será análogo a un sistema masa-resorte cuya excitación es dada por soltar el resorte desde un desplazamiento que se mide desde la posición de equilibrio, se tocó la guitarra con un pick de tal manera que la cuerda se suelta desde un desplazamiento con el pick sin aplicar una fuerza externa. La distancia desde la cápsula del micrófono hasta la boca de la guitarra fue de 10 cms.

La sala ofrece un tiempo de reverberación de 0.157 segundos medido para la sala utilizando el método de fuente interrumpida conforme la norma ISO 3382-2 (ver Anexo para medición del recinto) y basado en el método de Schroeder.

**Figura 4-4** Medición del Rt60 para la Sala de mastering de la Universidad San Buenaventura



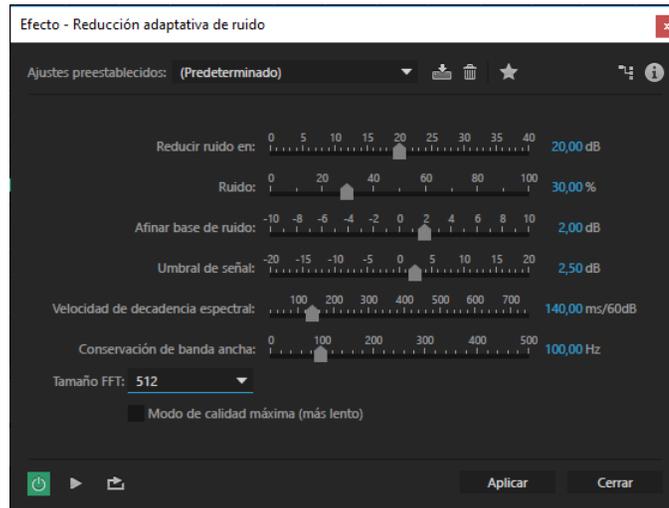
*Fuente: Imagen Original*

Teniendo en cuenta que la distancia desde la guitarra hasta el micrófono es muy corta, se puede afirmar que el nivel de presión sonora emitido por la guitarra es igual al nivel de presión sonora en campo directo y no se tiene en cuenta el campo reverberante (Carrión, p62, 1998)

#### 4.1.2 Filtrado de ruido

Para filtrar el ruido de la señal se utilizó la herramienta filtro adaptativo de Adobe Audition 3 con las siguientes características

**Figura 4-5** Herramienta de reducción adaptativa de ruido

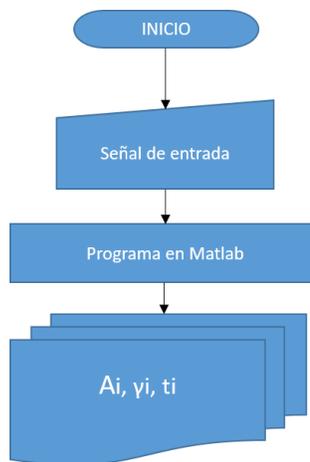


*Fuente: Imagen Original*

## 4.2 Análisis de la señal y obtención de los parámetros de entrada del sintetizador

El objetivo de ésta etapa del proyecto es desarrollar una herramienta que permita analizar la señal correspondiente a la representación digital para el sonido de las notas de una guitarra acústica y obtener los parámetros que permitan caracterizar computacionalmente la envolvente para cada armónico del sonido en un sintetizador.

**Figura 4-6** Diagrama de flujo para obtener los parámetros de entrada



*Fuente: Imagen Original*

Los tres parámetros necesarios para modelar la envolvente de los armónicos en la siguiente etapa de programación son:

$A_i$ : Amplitud máxima

$\gamma_i$ : Constante de amortiguamiento

$t_i$ : Tiempo de decaimiento

$i$ : Número del armónico

#### 4.2.1 Obtención del contenido energético de los armónicos

Para hallar la variación energética en las frecuencias armónicas del sonido grabado de la guitarra se implementó la STFT (Short Time Fourier Transform), la cual es una función computacional que permite hallar la variación energética con respecto al tiempo en frecuencias determinadas (Smith, Cap 8, 2011). El análisis de ésta variación de energía en el tiempo es el que permite hallar los parámetros necesarios para el diseño del sintetizador, para tal propósito se implementó la función *Spectrogram* en la plataforma Matlab, ésta función halla la STFT de una variable que contiene la señal digitalizada de un archivo de audio (la grabación de una nota musical de la guitarra).

Para la síntesis de sonido, la STFT ha sido utilizada dentro de diversas técnicas, una de ellas es la síntesis cruzada que consiste en analizar la evolución de un parámetro de un sonido determinado y aplicárselo a otro (Smith, 2011). Un ejemplo para la aplicación de esta técnica es el de agregarle habla a sonidos naturales como “El viento que habla”. En este caso hay una señal portadora (viento, lluvia, chirridos) y una moduladora (voz). Otro ejemplo es el vocoder en instrumentos musicales que consisten de un teclado sintetizador (portadora) y un micrófono que registra la voz (moduladora).

Teniendo en cuenta que el objetivo principal del proyecto es diseñar un sintetizador aditivo en el cual se necesitarán parámetros de diseño para cada armónico, hay que analizar la señal de tal manera que sea modelable como la sumatoria de sus armónicos, para analizar la señal del sonido de esta manera hay que desarrollar una herramienta que permita ver cada sumando por separado y su respectiva variación en el tiempo para poder hallar los parámetros necesarios en el modelamiento de cada armónico.

Si un solo oscilador armónico que atenúa su amplitud en el tiempo puede representarse como:

$$x(t) = Ae^{-\gamma t} \cos(\omega t + \phi) \quad (4-5)$$

Entonces la señal completa puede representarse como la sumatoria de 11 osciladores armónicos:

$$X(t) = \sum_{i=1}^{11} A_i e^{-\gamma_i t} \cos(\omega_i t + \phi_i) \quad (4-6)$$

Donde:

$x(t)$ : Armónico

$A_i$ : Amplitud

$\gamma_i$ : Constante de amortiguamiento

$\omega_i$ : Frecuencia

$\phi_i$ : Fase

$X(t)$ : Señal resultante representada como la sumatoria de 11 señales oscilatorias que atenúan su amplitud en el tiempo.

Teniendo en cuenta que la función coseno modela la oscilación del armónico, la envolvente del oscilador puede representarse como:

$$E_i(x) = A_i e^{-\gamma_i t} \quad (4-7)$$

Para hallar la amplitud  $A_i$  se tomó el pico máximo en la gráfica de cada armónico, este valor corresponde al valor máximo de la envolvente exponencial decreciente que modula al oscilador.

Para hallar la constante de amortiguamiento  $\gamma$  se realizó una regresión exponencial sobre los valores de amplitud con respecto al tiempo, con la regresión exponencial se puede hallar el valor de una constante de decaimiento a partir de una señal de entrada en función del tiempo. Las once frecuencias que se tomaron para modelar la señal resultante corresponden a la frecuencia fundamental de cada nota y los armónicos con mayor contenido energético que corresponden a la desafinación en intervalo musical de Tercera Mayor, Quinta Justa y Octava mayor con respecto a la fundamental en cada octava.

**Tabla 4-1** Proporción de los armónicos sobre la frecuencia fundamental

Desafinación	Proporción sobre la frecuencia fundamental	Número del armónico
Fundamental	1	Fundamental
Octava	2	Segundo
Quinta Justa	3	Tercer
Octava	4	Cuarto
Tercera Mayor	5	Quinto
Quinta Justa	6	Sexto
Octava	8	Octavo
Tercera Mayor	10	Décimo
Quinta Justa	12	Decimosegundo
Octava	16	Decimosexto
Tercera Mayor	20	Vigésimo

*Fuente: Tabla Original*

La fase es un parámetro que no se tuvo en cuenta para el diseño del sintetizador ya que las variaciones de fase influyen sonoramente en la sumatoria de dos sonidos o más si la frecuencia de estos sonidos es la misma y para éste caso las frecuencias son diferentes. Éste fenómeno acústico se implementa de manera práctica para sistemas de control de ruido activo donde se quieren eliminar ciertas frecuencias a través de la de cancelación de fases. (Penagos, p8, 2001)

Otro parámetro necesario para el diseño del sintetizador es el tiempo de decaimiento de cada armónico, este tiempo puede calcularse a partir de la constante de amortiguación teniendo en cuenta el Audio Decay Time más conocido como el  $t_{60}$ , Moser y Barros establecen que éste es el tiempo en el cual el sonido decae a la millonésima parte de su intensidad inicial. Si la definición del decrecimiento exponencial corresponde:

$$A(t) = A_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4-8)$$

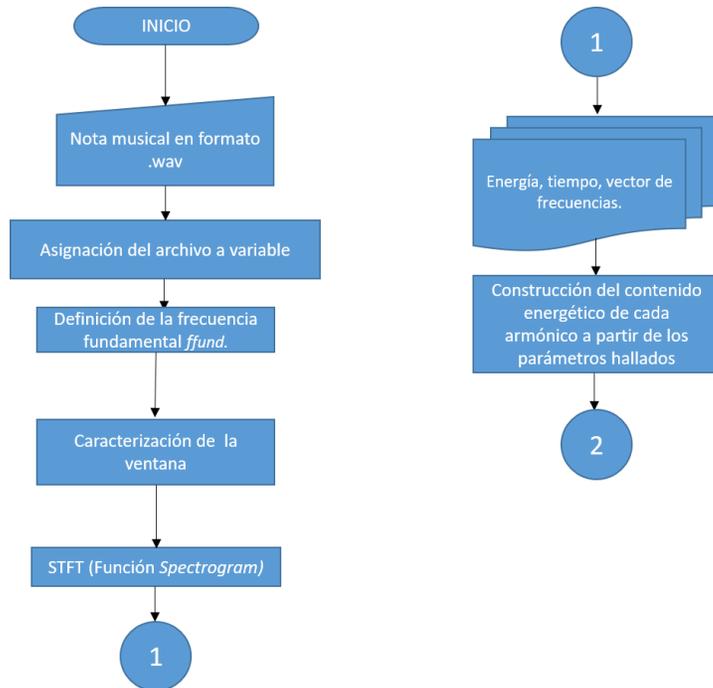
Y teniendo en cuenta la ecuación de la envolvente es  $E_i(x) = A_i e^{-\gamma_i t}$  entonces se puede afirmar que

$$\gamma = \frac{1}{\tau}$$

Si el decay time es  $t_{60} = 6.91\tau$  para dejarlo en términos de la constante de amortiguación entonces el  $t_{60} = \frac{6.91}{\gamma}$ .

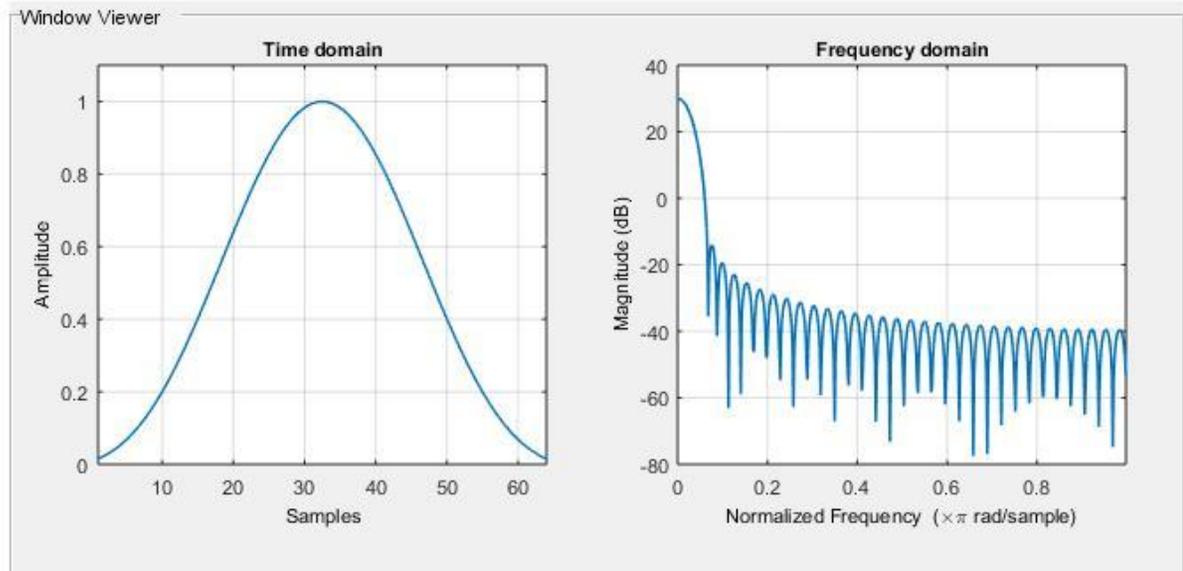
#### 4.2.2 Algoritmo para caracterizar el contenido energético en los armónicos de una nota musical

**Figura 4-7** Algoritmo para caracterizar el contenido energético en los armónicos de una nota.



*Fuente: Imagen Original*

A través del programa Matlab, se aplicó la STFT bajo una ventana tipo *Kaiser* con una longitud de 64 muestras, un parámetro  $\beta = 6$  y un *overlap* de 13 muestras en las notas F2, G#2, B2, D3, F3, G#3, B3, D4, F4, G#4, B4 para hallar el comportamiento energético de la frecuencia fundamental y sus respectivos armónicos a través del tiempo.

**Figura 4-8** Caracterización de la ventana utilizada.

*Fuente: Imagen Original*

Se escogió la ventana Kaiser ya que al modificar su parámetro  $\beta$  se puede modificar el ancho de la ventana y ver de manera precisa el comportamiento de cada armónico en el dominio de la frecuencia, con la longitud y el overlap escogidos, al tener una frecuencia de muestreo de 44100 Hz (44100 muestras por segundo o una muestra cada  $44100^{-1} = 0.0226$  milisegundos) en la señal, se obtiene una gran resolución ya que al tener una longitud de 64 muestras se estaría tomando una muestra cada  $64 \times 0.0224 \times 10^{-3} = 1.45$  milisegundos. Se escogió el valor  $\beta = 6$  ya que como se observa en la gráfica, se obtiene una ventana donde se atenúan de manera notable las frecuencias laterales que se dan al efectuar el proceso de ventaneo, si se escogiese un valor de  $\beta = 0$  o aproximado a 0 se obtendría una ventana rectangular y esto como si no se estuviese efectuando el proceso de ventaneo, si se escogiese un valor mayor se estaría reduciendo el ancho de la ventana y se dejarían de caracterizar valores en el dominio del tiempo. (Native instruments)

En cuanto a la amplitud, cuando se digitalizó la señal grabada en formato .wav se utilizó un bit depth de 16 bits, lo cual significa que se pueden obtener  $2^{16} = 65536$  posibles valores de amplitud para cada muestra (32268 a -32268) y un rango dinámico de  $20 \log_{10}(2^{16}) = 96.33$  dBfs (Kester, 2009). Para este proyecto se utilizaron los valores que provee la función Audioread en la plataforma matlab, los cuales corresponden al formato normalizado Double que oscilan entre 1 y -1 (Matlab Guide, 2016).

La STFT se implementó utilizando la función *spectrogram* de Matlab:

```
[~, f, t, pxx] = spectrogram(x, window, noverlap, f, fs)
```

Donde los parámetros de entrada son:

$x$ : Representa la señal de entrada, para este caso es la variable con la señal de la nota grabada

$window$ : Representa la ventana utilizada, para éste caso se utilizó la ventana  $Kaiser(L, beta)$  donde  $L$  es el número de muestras de la ventana y  $beta$  es el parámetro característico para el ancho de la ventana. Para este caso se utilizó un  $L$  de 64 muestras y un  $beta$  de 6.

$noverlap$ : Es el parámetro que representa el número de muestras de superposición utilizado en la ventana, para éste caso se utilizaron  $64-13=51$  muestras.

$f$ : Representa el vector de frecuencias utilizado en la ventana, para éste caso se utilizó un vector de 160 frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental en la nota analizada

$fs$ : Representa la frecuencia de muestreo implementada para todas las señales, en este caso es de 44100 hz.

Los parámetros de salida son:

$f$ : Representa el vector de frecuencias definido en la ventana tal cómo se definió en la entrada.

$t$ : Representa el vector de tiempo, cuyo largo está definido por el número de muestras utilizado en cada señal y en cada armónico.

$pxx$ : Representa una matriz con los valores de las potencias cuyo largo es de 160 (número de frecuencias analizadas) por el número de muestras del vector de tiempo.

Si se implementan las funciones en la nota F2 se tiene:

```
Fs=44100;//Frecuencia de muestreo
```

```
[F2,Fs] = audioread('F2.wav');//Asignación de las señales grabadas en archivos .wav a variables con el nombre de la nota
```

```
w0F2=87.3;//Definición de la frecuencia fundamental
```

```
[~,FF2,TF2,PF2] = spectrogram(F2,kaiser(64,6),64-13,(1:0.5:80)*(w0F2),Fs);//Aplicación de la STFT a las señales para hallar el contenido energético en 160 frecuencias múltiplos de  $w_0$ .
```

```
HarmF2=PF2(1,:);//Definición de los armónicos donde PNX representa la matriz de potencias de cada nota y los valores entre paréntesis son los que corresponden a la fila dada por la frecuencia del armónico con los valores en potencia de cada armónico para ser asignado a la variable HarmNX.
```

```

Harm1F2=PF2(3,:);
Harm2F2=PF2(5,:);
Harm3F2=PF2(7,:);
Harm4F2=PF2(9,:);
Harm5F2=PF2(11,:);
Harm6F2=PF2(15,:);
Harm7F2=PF2(19,:);
Harm8F2=PF2(23,:);
Harm9F2=PF2(31,:);
Harm10F2=PF2(39,:);

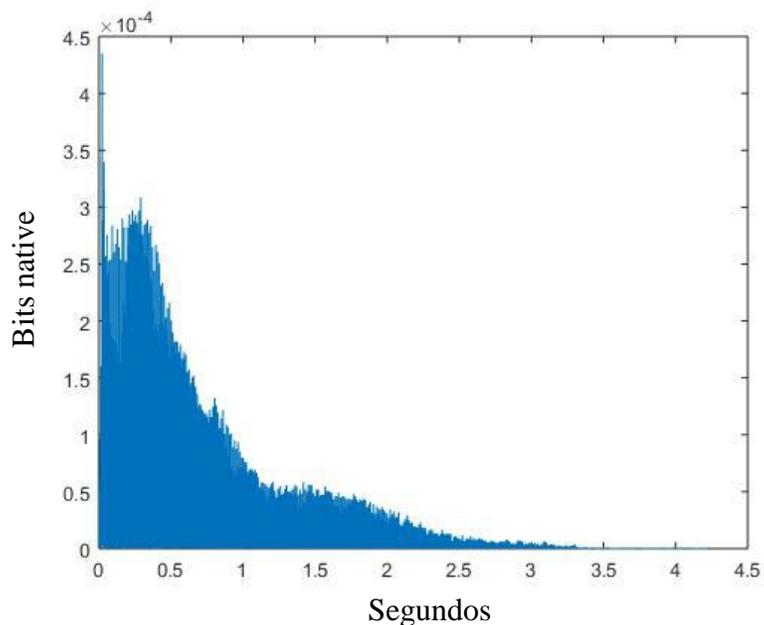
```

Para graficar cada armónico con respecto al tiempo se implementó la función *plot*, la cual grafica un vector con respecto a otro. Para graficar la fundamental con respecto al tiempo se implementó así:

```
plot(TF2,HarmF2);
```

El eje x de las figuras corresponde al tiempo medido en segundos y el eje y corresponde a la amplitud normalizada en valores Double.

**Figura 4-9** Comportamiento energético de la frecuencia fundamental de la nota F2

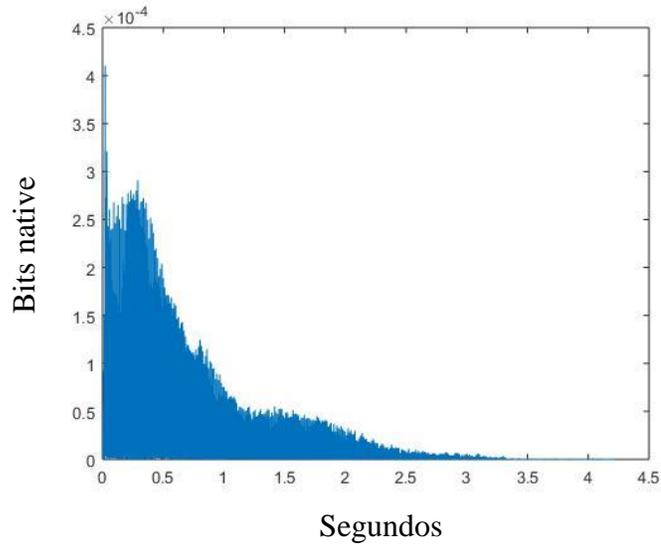


*Fuente: Imagen Original*

Donde TF2 representa el vector del tiempo definido en la función *spectrogram* y HarmF2 representa el armónico definido a partir de su contenido energético hallado con la función *spectrogram*. Se implementa así para el resto de armónicos con la misma variable de tiempo:

```
plot(TF2,Harm1F2);
```

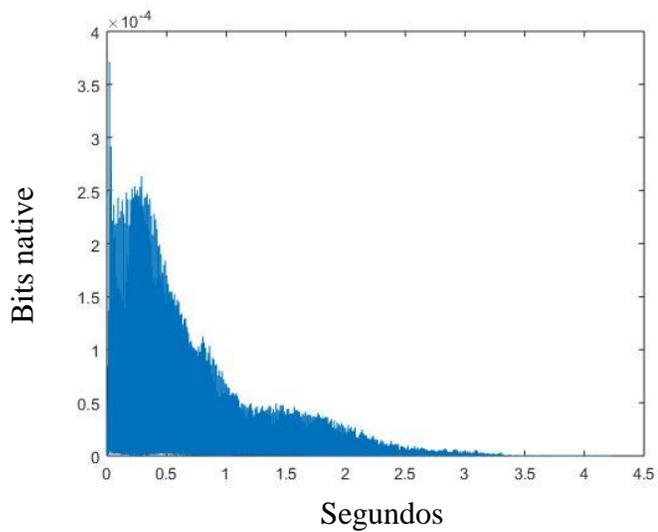
**Figura 4-10** Comportamiento energético del segundo armónico de la nota F2



*Fuente: Imagen Original*

```
plot(TF2,Harm2F2);
```

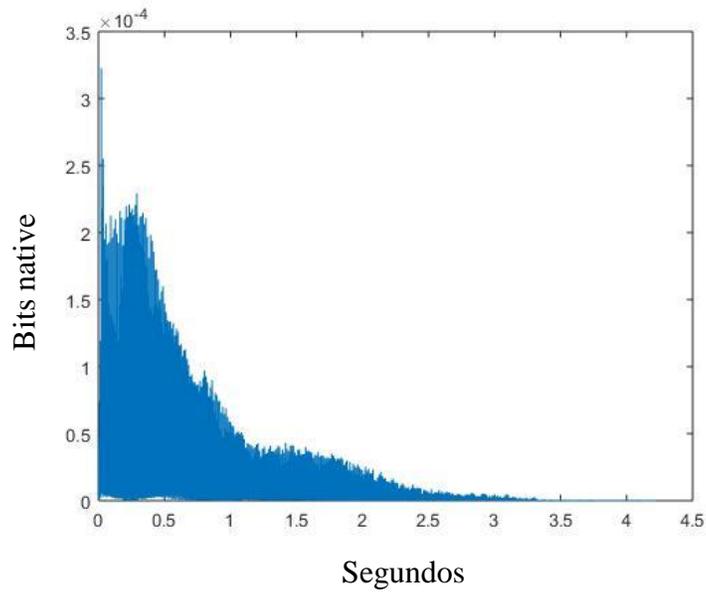
**Figura 4-11** Comportamiento energético del tercer armónico de la nota F2



*Fuente: Imagen Original*

```
plot(TF2,Harm3F2);
```

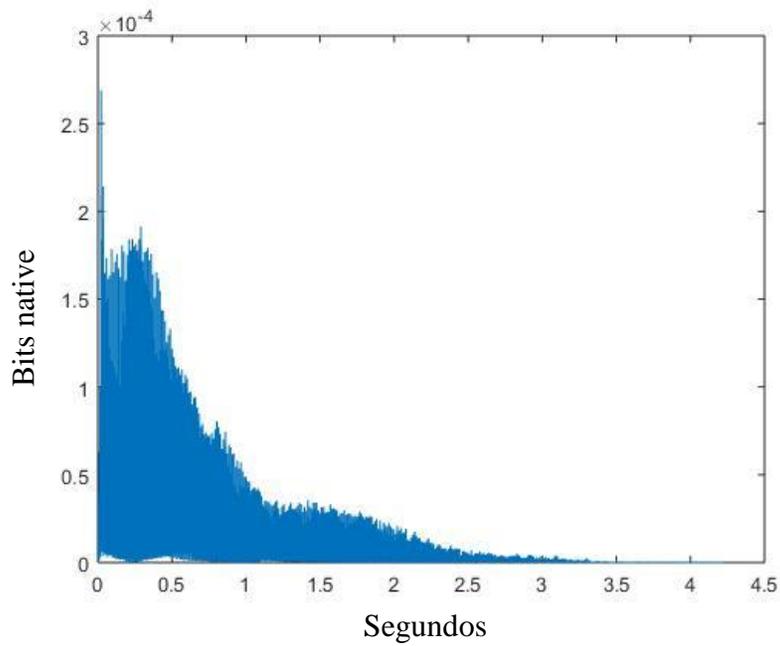
**Figura 4-12** Comportamiento energético del cuarto armónico de la nota F2



*Fuente: Imagen Original*

```
plot(TF2,Harm4F2);
```

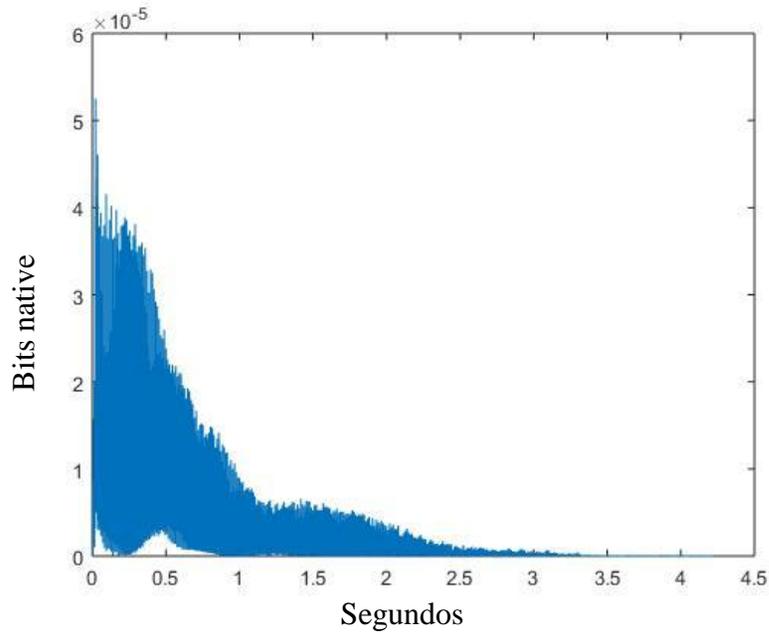
**Figura 4-13** Comportamiento energético del quinto armónico de la nota F2



*Fuente: Imagen Original*

```
plot(TF2,Harm5F2);
```

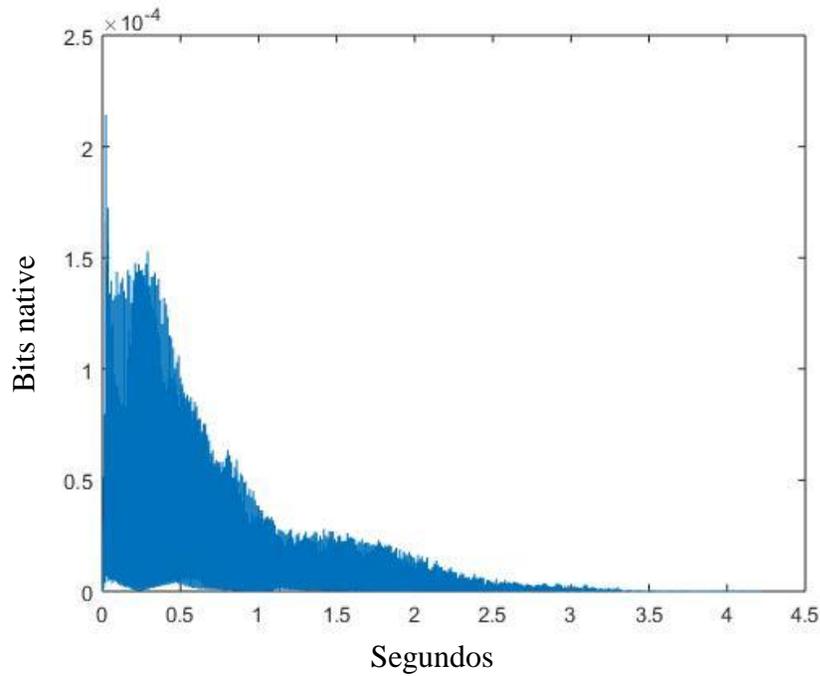
**Figura 4-14** Comportamiento energético del sexto armónico de la nota F2



*Fuente: Imagen Original*

```
plot(TF2,Harm6F2);
```

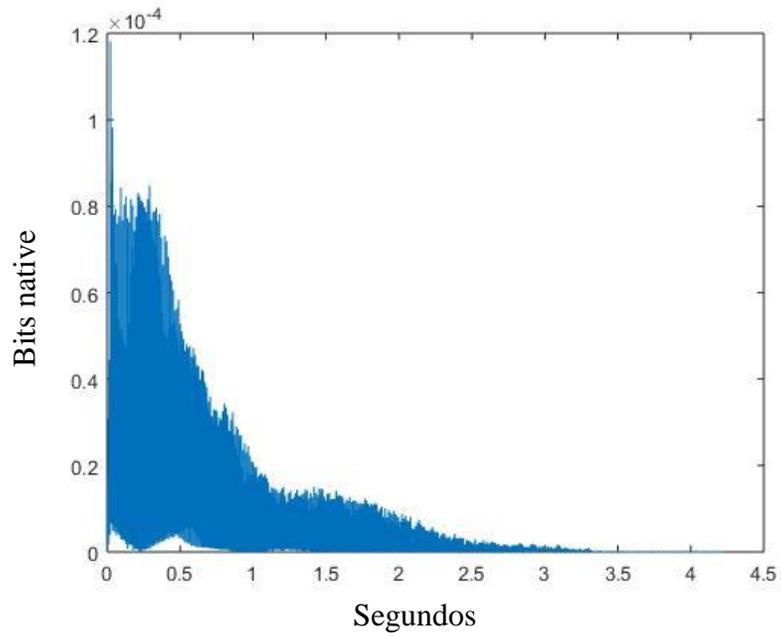
**Figura 4-15** Comportamiento energético del octavo armónico de la nota F2



*Fuente: Imagen Original*

```
plot(TF2,Harm7F2);
```

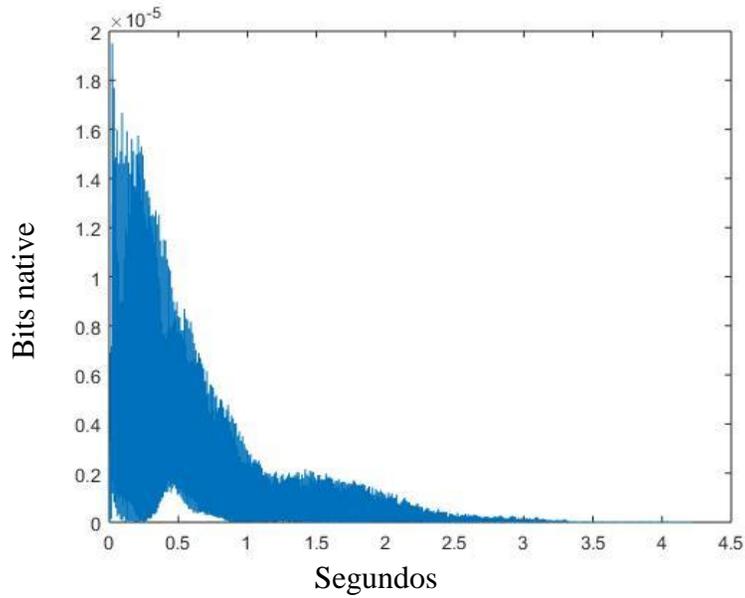
**Figura 4-16** Comportamiento energético del décimo armónico de la nota F2



*Fuente: Imagen Original*

```
plot(TF2,Harm8F2);
```

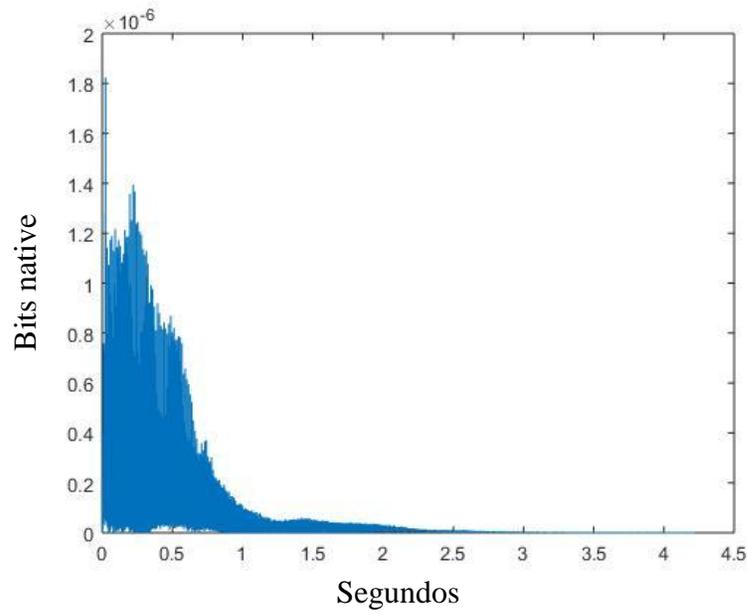
**Figura 4-17** Comportamiento energético del doceavo armónico de la nota F2



*Fuente: Imagen Original*

```
plot(TF2,Harm9F2);
```

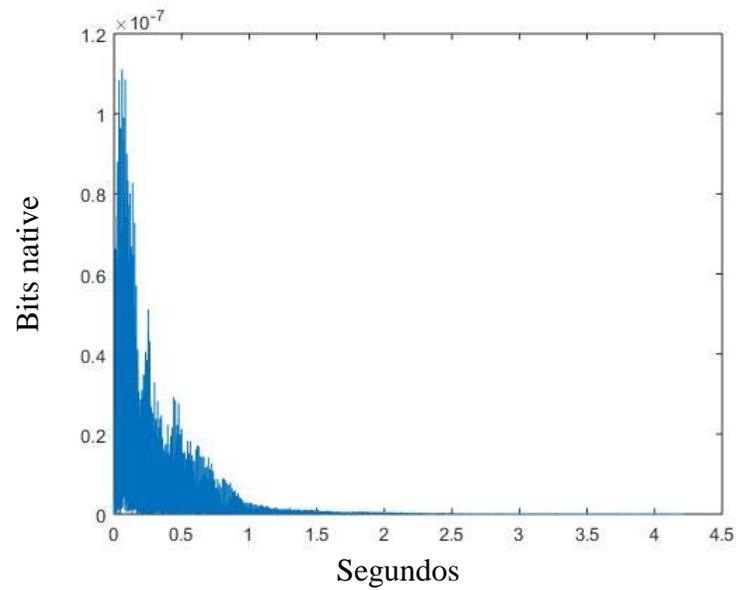
**Figura 4-18** Comportamiento energético del decimosexto armónico de la nota F2



*Fuente: Imagen Original*

`plot(TF2,Harm10F2);`

**Figura 4-19** Comportamiento energético del vigésimo armónico de la nota F2



*Fuente: Imagen Original*

Para obtener la envolvente de cada armónico se utiliza la función *findpeaks* para hallar el contorno de la gráfica con los puntos máximos de la función hallada. Ya que la función resultante tiene picos locales, se hicieron 3 iteraciones de la función para hallar los picos máximos de la función.

Entradas de la función *findpeaks*:

*HarmNX*: Función con los valores energéticos correspondientes a los armónicos de cada nota.

*TNX*: Función con el vector de tiempo de cada nota.

Salidas de la función *findpeaks*:

*pharmNX*: Valor de la amplitud de los picos hallados.

*TharmNX*: Valor en tiempo para cada pico hallado.

*wNX*: Valor de los anchos entre los picos hallados.

Implementación en la nota F2:

```
[pharmF2,tharmF2,wF2]=findpeaks(HarmF2,TF2);//primera iteración
```

```
[pharmFF2,tharmFF2,wF2]=findpeaks(pharmF2,tharmF2); //segunda iteración
```

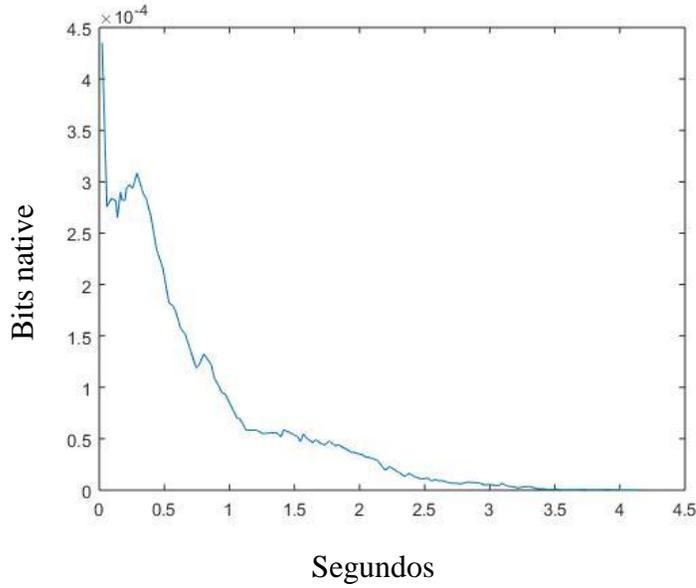
```
[pharmFFF2,tharmFFF2,wF2]=findpeaks(pharmFF2,tharmFF2); // tercera iteración
```

Para graficar los contornos que representan la envolvente de cada armónico se implementó la función *plot* con la variable *pharmFFF2* en la ordenada y *tharmFFF2* en la abscisa para representar la envolvente de la frecuencia fundamental.

Implementación para los armónicos de la nota F2:

```
plot(tharmFFF2,pharmFFF2);
```

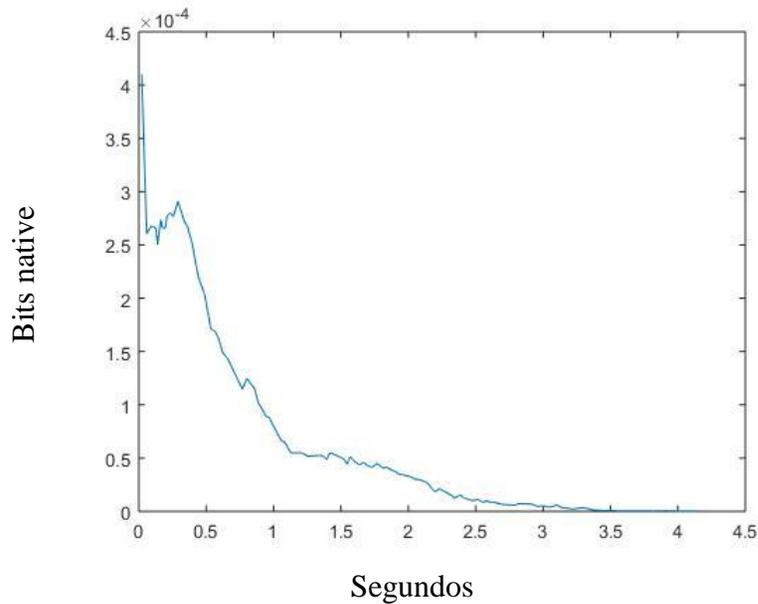
**Figura 4-20** Envoltora de la frecuencia fundamental para la nota F2



*Fuente: Imagen Original*

```
plot(tharm1FFF2,pharm1FFF2);
```

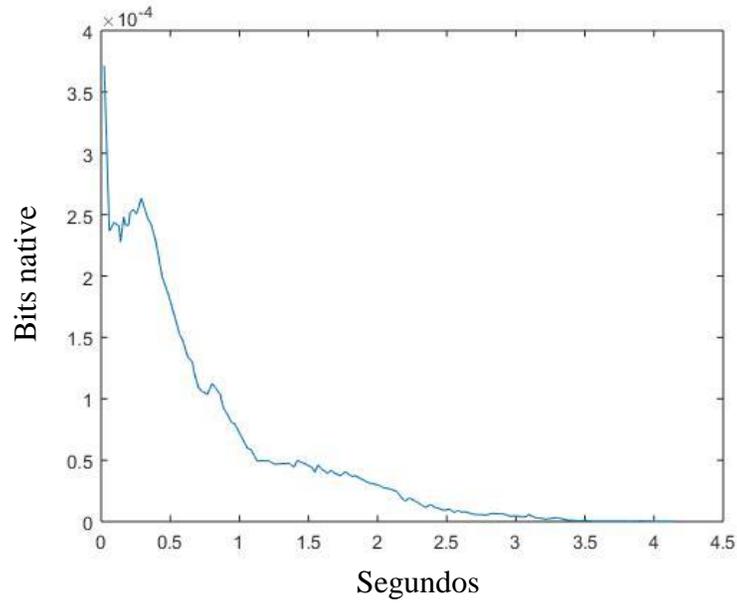
**Figura 4-21** Envoltora del segundo armónico para la nota F2



*Fuente: Imagen Original*

```
plot(tharm2FFF2,pharm2FFF2);
```

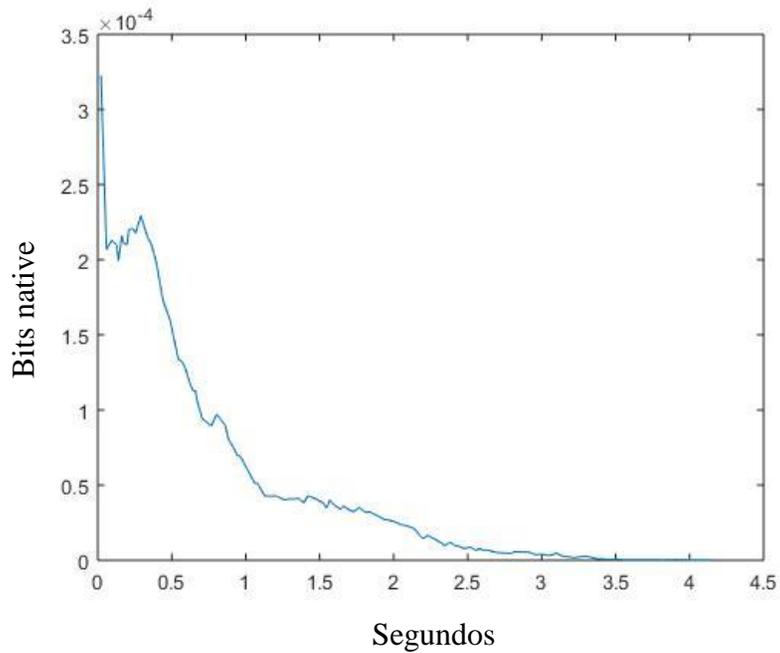
**Figura 4-22** Envoltora del tercer armónico para la nota F2



*Fuente: Imagen Original*

```
plot(tharm3FFF2,pharm3FFF2);
```

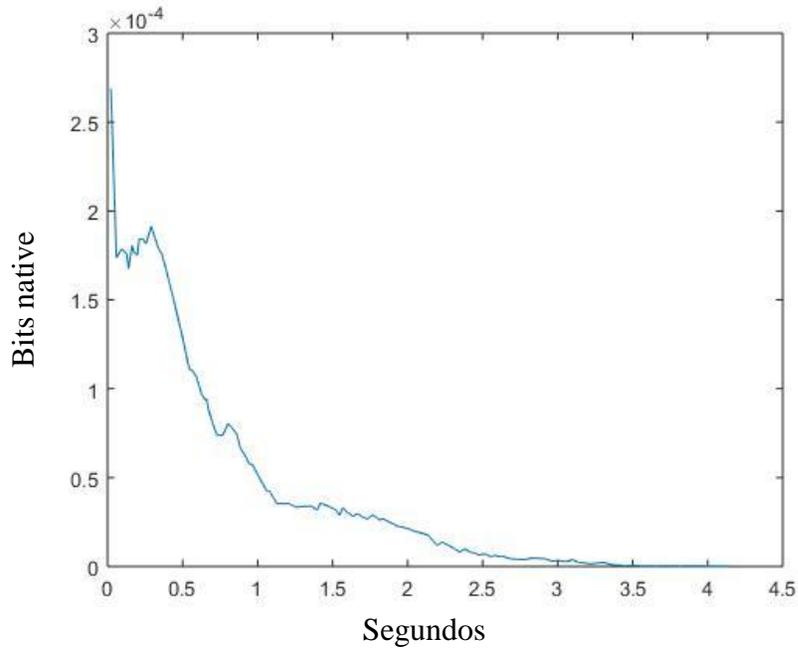
**Figura 4-23** Envoltora del cuarto armónico para la nota F2



*Fuente: Imagen Original*

```
plot(tharm4FFF2,pharm4FFF2);
```

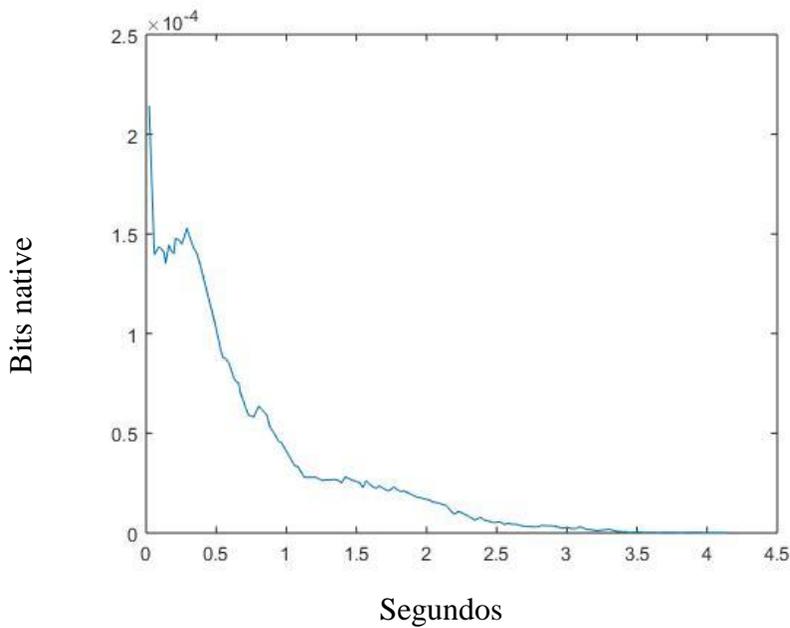
**Figura 4-24** Envoltente del quinto armónico para la nota F2



*Fuente: Imagen Original*

```
plot(tharm5FFF2,pharm5FFF2);
```

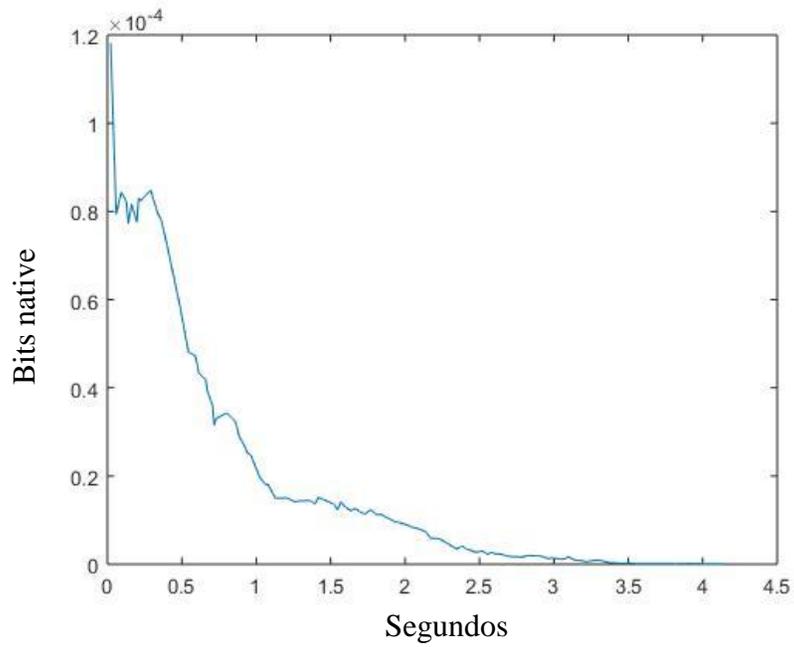
**Figura 4-25** Envoltente del sexto armónico para la nota F2



*Fuente: Imagen Original*

```
plot(tharm6FFF2,pharm6FFF2);
```

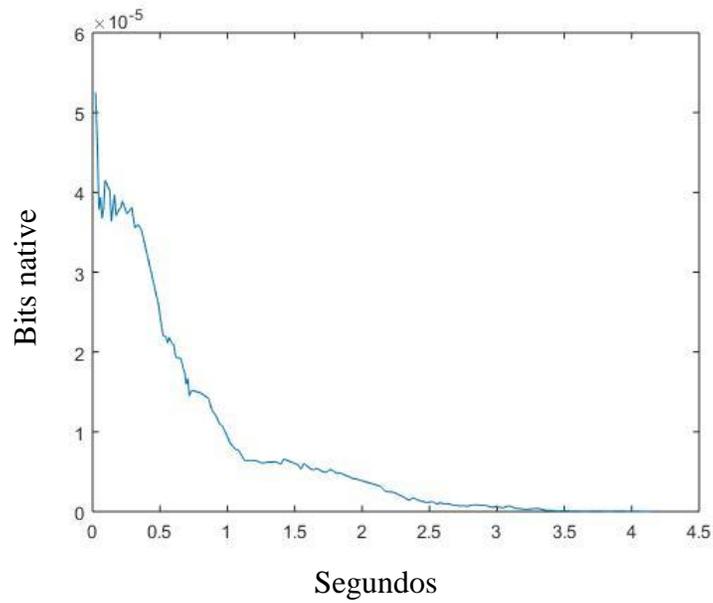
**Figura 4-26** Envoltente del octavo armónico para la nota F2



*Fuente: Imagen Original*

```
plot(tharm7FFF2,pharm7FFF2);
```

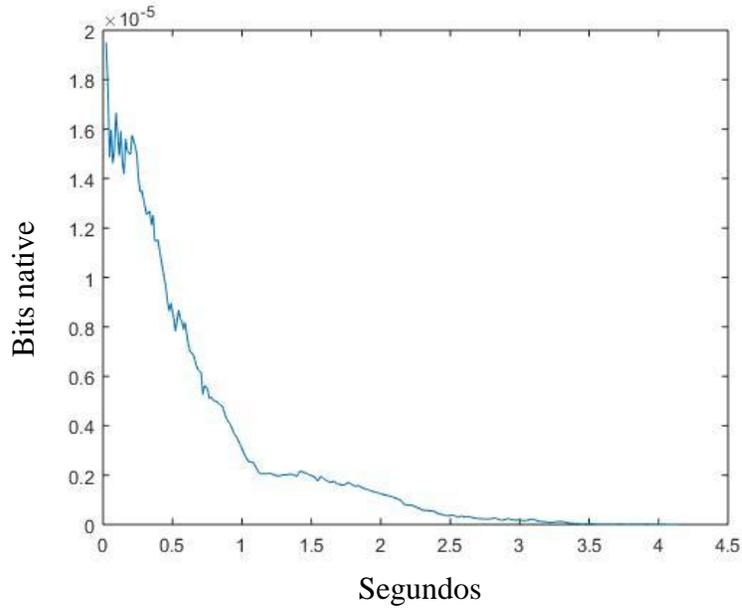
**Figura 4-27** Envoltente del décimo armónico para la nota F2



*Fuente: Imagen Original*

```
plot(tharm8FFF2,pharm8FFF2);
```

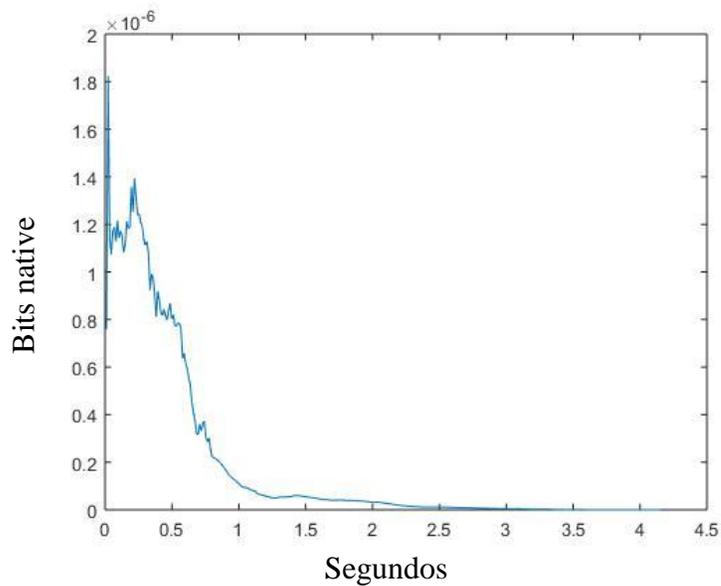
**Figura 4-28** Envoltente del doceavo armónico para la nota F2



*Fuente: Imagen Original*

```
plot(tharm9FFF2,pharm9FFF2);
```

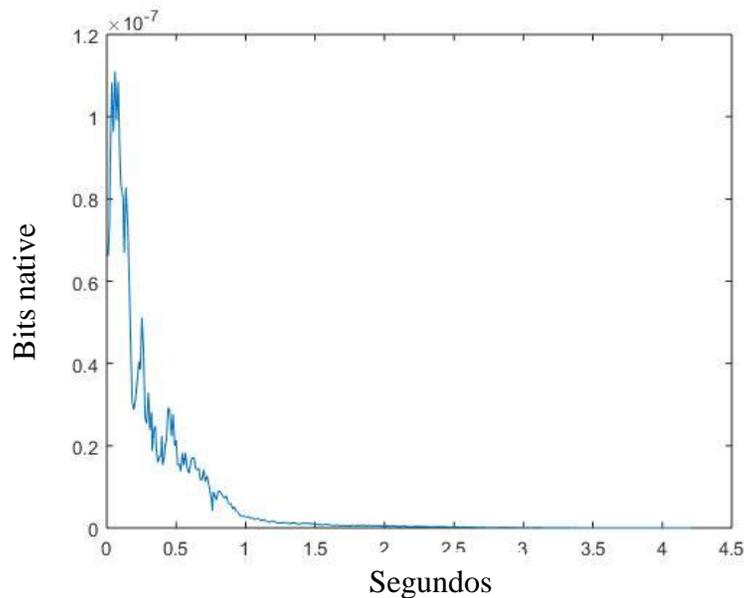
**Figura 4-29** Envoltente del decimosexto armónico para la nota F2



*Fuente: Imagen Original*

```
plot(tharm10FFF2,pharm10FFF2);
```

**Figura 4-30** Envolvente del segundo armónico para la nota F2



*Fuente: Imagen Original*

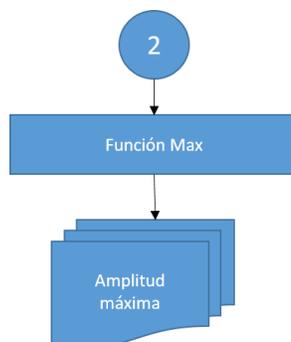
Como se puede observar, estas representaciones tienen un comportamiento donde la energía decae con respecto al tiempo. Ésta variación de energía es la que se va a aproximar a través de una regresión, a una función exponencial decreciente de la forma  $E(x) = Ae^{-\gamma t}$ , donde el parámetro  $\gamma$  representa la constante de amortiguamiento y  $A$  representa la amplitud máxima.

### 4.2.3 Obtención de los parámetros de entrada

A partir de la variación del contenido energético hallado para cada frecuencia armónica se pueden hallar los parámetros de Amplitud, Constante de amortiguamiento y tiempo de decaimiento para cada una de estas frecuencias.

Para obtener la amplitud máxima de la envolvente de cada armónico se implementó la función *max*, la cual a partir de una función de entrada, halla el punto máximo de su ordenada.

**Figura 4-31** Diagrama de flujo para obtener la amplitud máxima de cada armónico



*Fuente: Imagen Original*

Entrada de la función *max*:

*HarmNX*: Función con los valores energéticos correspondientes a los armónicos de cada nota.

Salidas de la función *polyfit*:

*AHNX*: Valor en tiempo de para cada pico hallado.

Se implementó así en los armónicos de la nota F2:

$$AHF2 = \max(\text{Harm}F2)$$

$$AH1F2 = \max(\text{Harm}1F2)$$

$$AH2F2 = \max(\text{Harm}2F2)$$

$$AH3F2 = \max(\text{Harm}3F2)$$

$$AH4F2 = \max(\text{Harm}4F2)$$

$$AH5F2 = \max(\text{Harm}5F2)$$

$$AH6F2 = \max(\text{Harm}6F2)$$

$$AH7F2 = \max(\text{Harm}7F2)$$

$$AH8F2 = \max(\text{Harm}8F2)$$

$$AH9F2 = \max(\text{Harm}9F2)$$

$$AH10F2 = \max(\text{Harm}10F2)$$

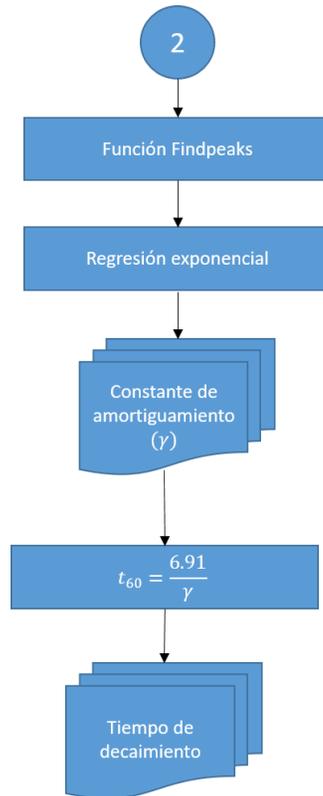
**Tabla 4-2** Tabla de valores de Energía (amplitud) máxima para armónicos de F2

Armónico de F2	Amplitud Máxima
Fundamental	0,0002176091
Segundo armónico	0,0002050819
Tercer armónico	0,0001856800
Cuarto Armónico	0,0001613651
Quinto armónico	0,0001344314
Sexto armónico	0,0001071694
Octavo armónico	0,0000590800
Décimo armónico	0,0000262565
Doceavo armónico	0,0000097550
Decimosexto armónico	0,0000009125
Vigésimo armónico	0,0000000555

*Fuente: Tabla original*

La constante de amortiguación de cada armónico fue calculada con la función *polyfit* de matlab, la variable *polyharm* corresponde al arreglo de dos números donde el primer valor corresponde al coeficiente de amortiguación  $\gamma$ .

**Figura 4-32** Diagrama de flujo para obtener la constante de amortiguamiento y el tiempo de decaimiento.



*Fuente: Imagen Original*

Entradas de la función *polyfit*:

*TharmFFNX*: Valor de tiempo para el contenido energético de cada armónico

*Log(pharmFFNX)*: Valor logarítmico de la amplitud para el contenido energético de cada armónico.

Salidas de la función *polyfit*:

*polyharmNX*: Corresponde a los coeficientes del polinomio exponencial donde el primer valor es el coeficiente de amortiguación requerido.

Implementación para los armónicos de la nota F2:

```
polyharmF2=polyfit(tharmFFF2,log(pharmFFF2),1);
```

```
polyharm1F2=polyfit(tharm1FFF2,log(pharm1FFF2),1);
```

```
polyharm2F2=polyfit(tharm2FFF2,log(pharm2FFF2),1);
```

```
polyharm3F2=polyfit(tharm3FFF2,log(pharm3FFF2),1);
```

```

polyharm4F2=polyfit(tharm4FFF2,log(pharm4FFF2),1);
polyharm5F2=polyfit(tharm5FFF2,log(pharm5FFF2),1);
polyharm6F2=polyfit(tharm6FFF2,log(pharm6FFF2),1);
polyharm7F2=polyfit(tharm7FFF2,log(pharm7FFF2),1);
polyharm8F2=polyfit(tharm8FFF2,log(pharm8FFF2),1);
polyharm9F2=polyfit(tharm9FFF2,log(pharm9FFF2),1);
polyharm10F2=polyfit(tharm10FFF2,log(pharm10FFF2),1);
    
```

**Tabla 4-3** Tabla de valores de constante de amortiguamiento para armónicos de F2

Armónico de F2	Constante de amortiguamiento (seg <sup>-1</sup> )
Fundamental	-1,718
Segundo armónico	-1,723
Tercer armónico	-1,722
Cuarto Armónico	-1,721
Quinto armónico	-1,724
Sexto armónico	-1,728
Octavo armónico	-1,753
Décimo armónico	-1,762
Doceavo armónico	-1,809
Decimosexto armónico	-2,265
Vigésimo armónico	-2,014

*Fuente: Tabla original*

Para hallar el tiempo de decaimiento de cada armónico se debe aplicar la relación que hay entre éste tiempo la constante de amortiguamiento, si el  $t_{60} = \frac{6.91}{\gamma}$ , entonces para cada armónico se implementa así:

$$DTF2 = (\text{polyharmF2}(1))^{(-1)} * (6.91);$$

$$DT1F2 = (\text{polyharm1F2}(1))^{(-1)} * (6.91);$$

$$DT2F2 = (\text{polyharm2F2}(1))^{(-1)} * (6.91);$$

$$DT3F2 = (\text{polyharm}3F2(1))^{(-1)} * (6.91);$$

$$DT4F2 = (\text{polyharm}4F2(1))^{(-1)} * (6.91);$$

$$DT5F2 = (\text{polyharm}5F2(1))^{(-1)} * (6.91);$$

$$DT6F2 = (\text{polyharm}6F2(1))^{(-1)} * (6.91);$$

$$DT7F2 = (\text{polyharm}7F2(1))^{(-1)} * (6.91);$$

$$DT8F2 = (\text{polyharm}8F2(1))^{(-1)} * (6.91);$$

$$DT9F2 = (\text{polyharm}9F2(1))^{(-1)} * (6.91);$$

$$DT10F2 = (\text{polyharm}10F2(1))^{(-1)} * (6.91);$$

**Tabla 4-4** Tabla de tiempos de decaimiento para armónicos de F2

Armónico de F2	Tiempo de decaimiento (seg)
Fundamental	4,02193042
Segundo armónico	4,01136165
Tercer armónico	4,01243274
Cuarto Armónico	4,0146585
Quinto armónico	4,00858695
Sexto armónico	3,99772942
Octavo armónico	3,94191453
Décimo armónico	3,92146581
Decimosegundo armónico	3,81875281
Decimosexto armónico	3,05106344
Vigésimo armónico	3,43170049

*Fuente: Tabla original*

Para ver los valores hallados para los armónicos de todas las notas ir al anexo C, para ver el análisis dimensional de la variación energética ver anexo A.

### 4.3 Análisis de proporcionalidad para representar la amplitud de los armónicos

Teniendo en cuenta que la señal grabada que posteriormente es analizada en Matlab y la señal representada en el sintetizador difieren en magnitud y en unidades, es necesario desarrollar un criterio que permita representar la señal de entrada en el sintetizador respetando la forma su comportamiento armónico.

Ya que la señal que ingresa a matlab con la función *Audioread* es representada en bits double y la constante de amplitud de los armónicos en flowstone es adimensional, es necesario conocer la proporción en la cual los bits double del matlab se representan en la amplitud del sintetizador. Para este propósito se implementó un sintetizador de un solo armónico, donde se grabaron tres sonidos con tres amplitudes diferentes obteniendo los siguientes resultados:

**Tabla 4-5** Análisis de proporcionalidad para representar la amplitud de los armónicos

Amplitud en flowstone (adimensional)	Valor de amplitud en matlab (bits double)	Factor de conversión
0,2	0,1558	1,28369705
0,3	0,2338	1,28314799
0,4	0,3117	1,28328521

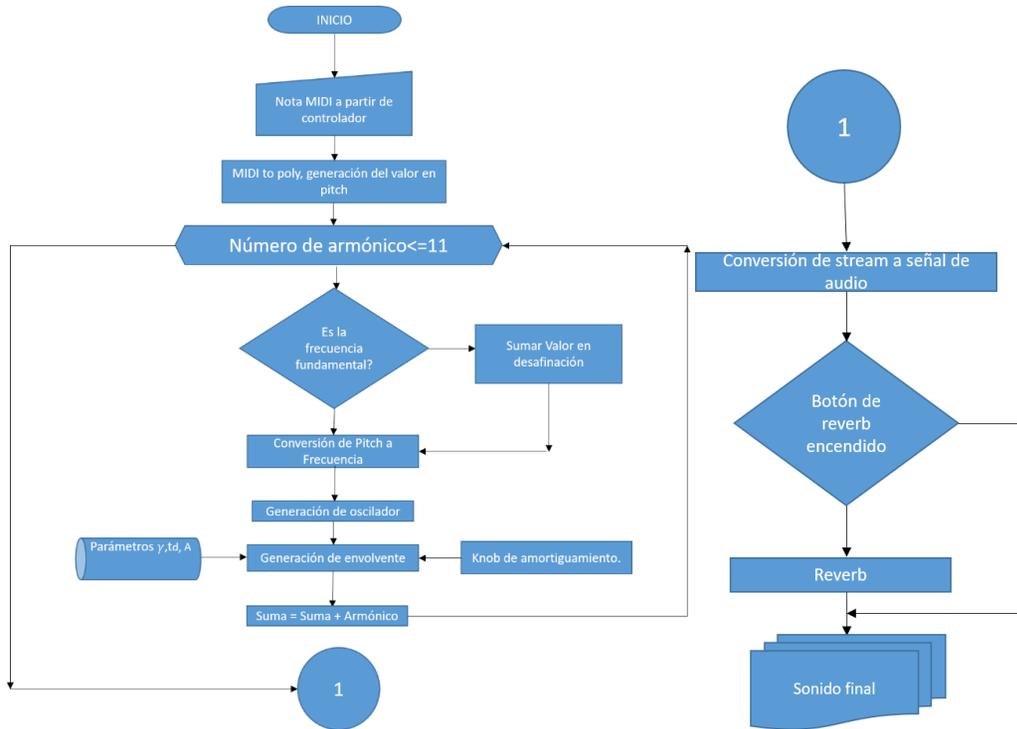
*Fuente: Tabla Original*

Se puede concluir que cualquier variación de amplitud en matlab es proporcional a la amplitud que se quiere representar en flowstone sin necesidad de realizar ningún ajuste ya que la característica principal del sintetizador es representar la relación que existe en amplitud entre sus armónicos.

### 4.4 Algoritmo del sintetizador

Con los parámetros hallados se procedió a programar el sintetizador en la plataforma Flowstone donde a partir de una nota musical pulsada por el usuario se obtiene el sonido del modelo desarrollado a partir del sonido de una guitarra acústica. Para que la nota musical ingresada por el usuario sea entendida en lenguaje computacional es necesario implementar el protocolo MIDI

**Figura 4-33** Diagrama de flujo para el diseño del sintetizador



*Fuente: Imagen original*

#### 4.4.1 Requerimientos de usuario

El usuario requiere una interfaz para activar el sonido del sintetizador, debe ser por un controlador MIDI que le permita tocar las notas de las 3 octavas que se programaron en el sintetizador, el plug-in también funciona con el teclado del computador pero tiene la limitante que solo sirve para tocar 2 octavas. Para correr el plug-in en formato VST, el usuario necesita un DAW de 32 bits ya que el plug-in se encuentra programado para esta configuración, el plug-in no funciona correctamente en un DAW de 64 bits.

#### 4.4.2 Conversión del valor de pitch a frecuencia de oscilación

Con los parámetros de entrada hallados, se programaron 11 osciladores senoidales cuya frecuencia de oscilación es dada a partir del pitch generado por la nota musical pulsada para el oscilador de la frecuencia fundamental y su desafinación en valor MIDI (ver tabla 4-12), para el resto de los armónicos, con el pitch calculado, se procede a convertir el valor MIDI a frecuencia. Para obtener la señal definida por el pitch de la nota se utilizó el módulo MIDI to poly (figura 4-11). La ecuación que modela cada uno de los armónicos utiliza la función coseno y el oscilador del programa utiliza la función seno pero teniendo en cuenta la identidad trigonométrica:

$$\text{Sen}(x) = \text{Cos}\left(\frac{\pi}{2} - x\right) \quad (4-9)$$

La función seno es equivalente a la función coseno con un desfase de 90 grados y como ya se especificó al principio del capítulo, la fase es un parámetro que no se obtuvo en cuenta para el diseño del sintetizador.

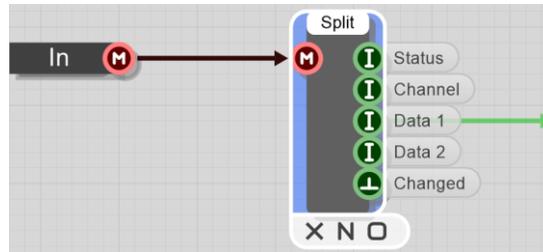
**Tabla 4-6** Desafinación en pitch de los armónicos

Desafinación (cents)	Proporción sobre la fundamental
0	1
12	2
19	3
24	4
28	5
31	6
36	8
40	10
43	12
48	16
52	20

*Fuente: Tabla original*

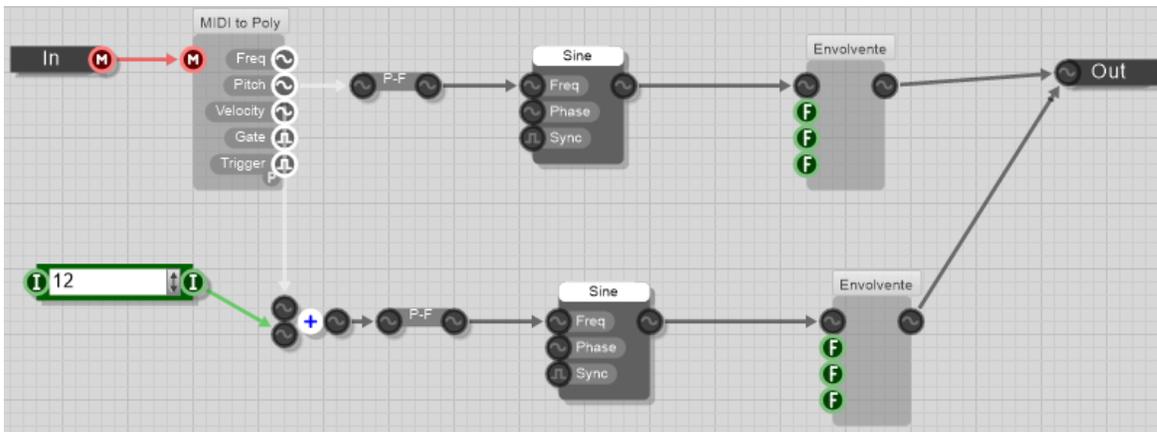
Para obtener el valor entero del pitch de la nota se utiliza el módulo MIDI Splitter (ver figura 4-10), éste módulo se encarga de obtener el valor MIDI de la nota musical en la salida Data 1, a este valor se le resta el valor de 41 que corresponde al valor de la nota F2 en note pitch para que el sintetizador empiece a trabajar desde esta nota (ver figura 4-14), a este valor se le divide entre 3 para que los valores de amplitud, tiempo y amortiguación guardados en su respectivo arreglo sean disparados para la nota pulsada y los 2 semitonos superiores.

**Figura 4-34** Módulo MIDI Splitter



*Fuente: Imagen Original*

**Figura 4-35** Detalle de caracterización de dos armónicos



*Fuente: Imagen Original*

#### 4.4.3 Módulos y arreglos de amplitud, tiempo de decaimiento y amortiguamiento

Cada módulo posee una entrada MIDI donde ingresa la nota musical y 11 valores flotantes correspondientes a los valores que van a ingresar a la envolvente del armónico. En la composición de cada módulo se encuentran 12 arreglos que contienen los valores flotantes de cada nota caracterizada en el sintetizador. El módulo de amortiguamiento posee una entrada de valor flotante que corresponde al valor de amortiguamiento que varía de -20 a 20 y es definido por el usuario a través del knob de la interfaz gráfica, éste valor corresponde al porcentaje de variación en el coeficiente de amortiguamiento y por consiguiente del tiempo de decaimiento. (Ver figura 4-12).

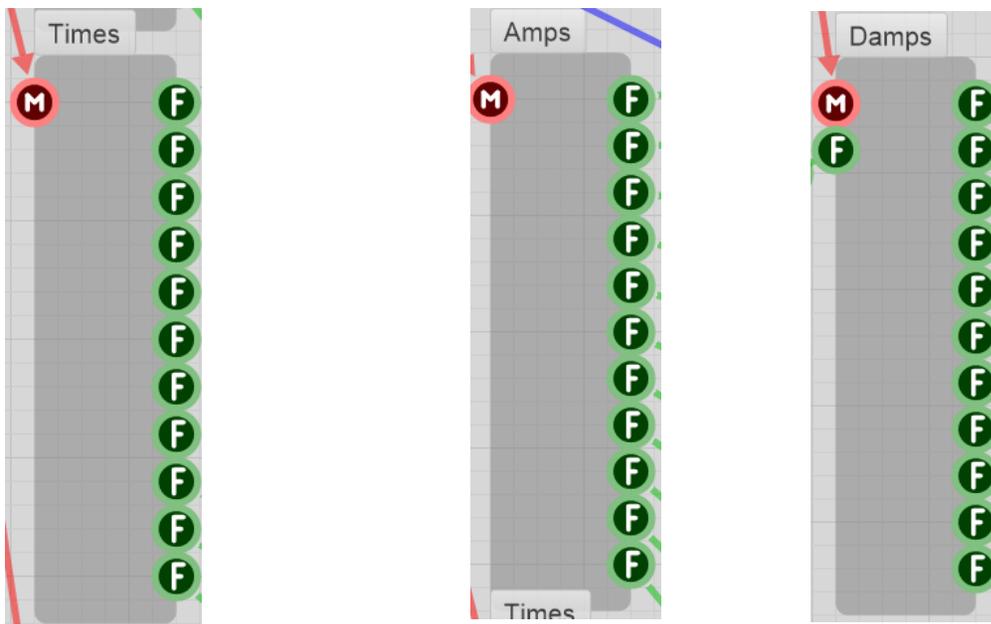
**Figura 4-36** Knob de amortiguamiento



*Fuente: Imagen Original*

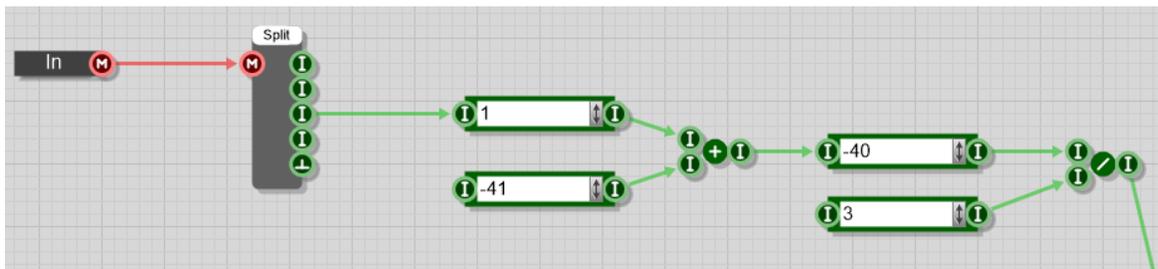
Cada arreglo posee 11 valores que corresponden dado el caso a los valores de amplitud, tiempo y amortiguamiento de cada armónico.

**Figura 4-37** Módulos de tiempos amplitudes y amortiguaciones



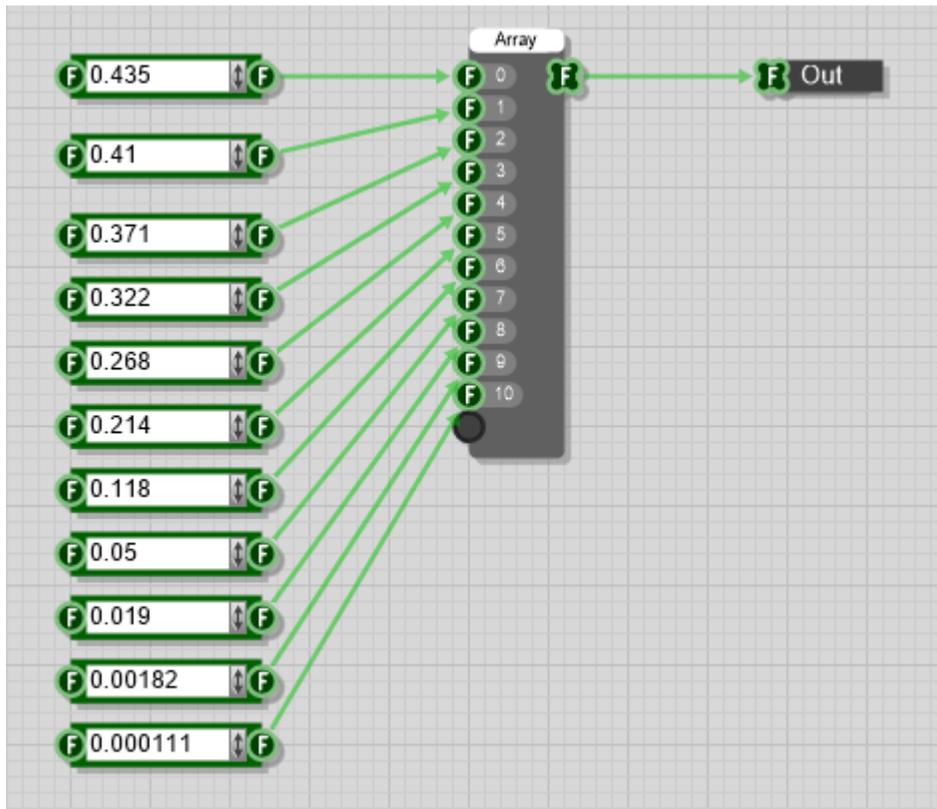
*Fuente: Imagen Original*

**Figura 4-38** Calibración de valores para que el sintetizador trabaje desde F2 y se caracterice cada 2 notas



*Fuente: Imagen Original*

**Figura 4-39** Ejemplo de construcción de un arreglo, amplitudes de la nota F2.

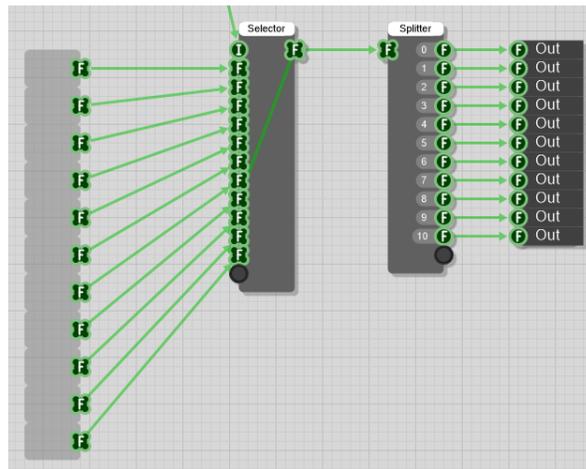


*Fuente: Imagen Original*

#### 4.4.4 Amplitud

Con el módulo Selector, se seleccionan los valores de cada arreglo, el índice de selección es el valor calibrado a partir del note pitch. Inicialmente el valor de amplitud que se ingresó en cada arreglo correspondía al hallado en Matlab cómo la amplitud máxima en la variable AHNX, pero ya que muchos valores obtenidos en éste cálculo resultaban inaudibles en las frecuencias especificadas se tomó la decisión de multiplicar éstos valores por 100 para que resultaran audibles. (Ver tablas)

**Figura 4-40** Selector de arreglos para valores de amplitud



*Fuente: Imagen Original*

#### 4.4.5 Tiempo de decaimiento

La construcción del selector es igual que la del módulo de amplitudes, para calibrar el tiempo calculado y pueda ser procesado por el programa, el valor se multiplicó por 347.41 que corresponde al valor computacional de un segundo en el programa.

Para que el knob de amortiguamiento influya en el valor del tiempo de decaimiento  $t_d$ , se procedió a multiplicar el valor de entrada del knob por 0.01 y a este valor sumarle 1:

Valor máximo (20%)

$$t_{d20} = t_d \times 1.2 \quad (4-10)$$

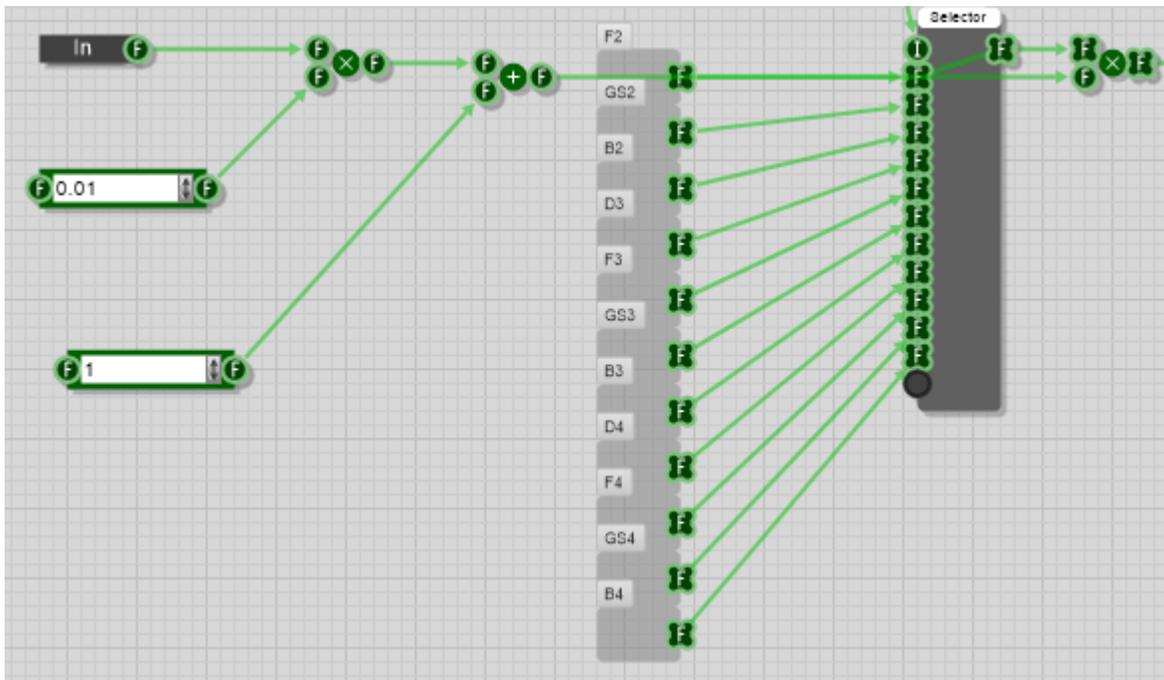
Valor mínimo (-20%)

$$t_{-d20} = t_d \times 0.8 \quad (4-11)$$

Valor en cero (valor original)

$$t_d = 1 \times t_d \quad (4-12)$$

**Figura 4-41** Selector de arreglos para valores de tiempos de decaimiento



*Fuente: Imagen Original*

#### 4.4.6 Amortiguamiento.

Teniendo en cuenta que los valores del coeficiente de amortiguamiento van de -1 a -13 y los valores de entrada del módulo de envolvente (Ver Módulo de la envolvente) van de 0.995 a 0.75, hay que hallar la diferencia entre los valores absolutos entre máximo y mínimo, el valor de esta diferencia sería el rango de valores a utilizar.

Otro factor que hay que tener en cuenta para hallar los valores máximos y mínimos y el rango de valores del coeficiente de amortiguación es la extensión de éste rango a causa del fader de amortiguamiento del usuario.

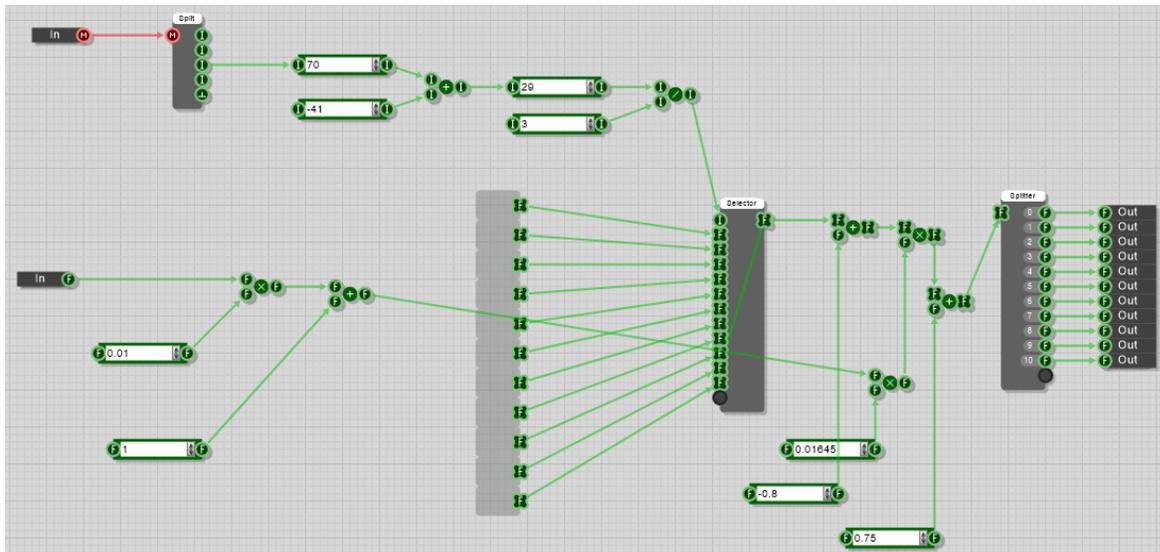
Teniendo en cuenta que el valor absoluto mínimo para la entrada de los coeficientes de amortiguación es de 1 y al llevar el fader de amortiguación de usuario hasta el valor mínimo que es -20 para disminuir el valor original del coeficiente al 20% entonces: el valor mínimo del coeficiente es

$\gamma_{\min}=(-0.2 \times 1) + 1 = 0.8$ , y para hallar el valor máximo del coeficiente se toma el valor máximo aumentado al 20%, entonces  $\gamma_{\max}=(0.2 \times 13) + 13 = 15.6$ .

Si los rangos de valores a utilizar son  $0.995 - 0.75 = 0.245$  para la entrada del módulo de envolvente y  $15.6 - 0.8 = 14.8$  para los coeficientes de amortiguación, entonces al valor original dado por el coeficiente de amortiguación habría que restarle 1 y multiplicarlo por  $0.245 / 14.8 = 0.01655$  que sería el factor de conversión. Ver figura 4-18.

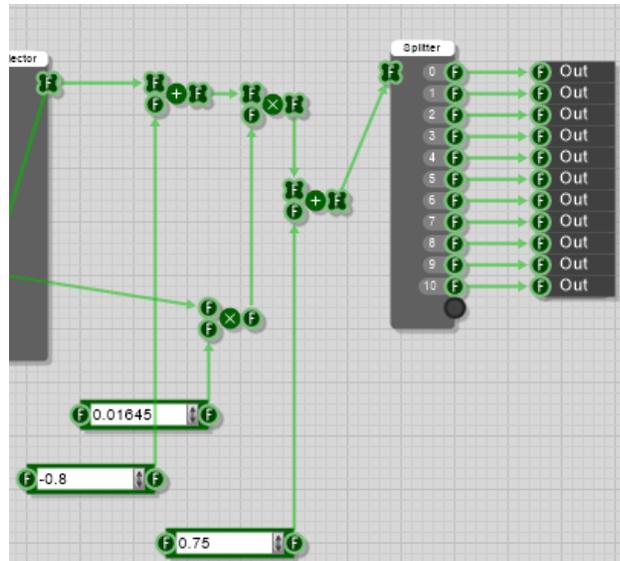
Para hallar el valor final a ingresar al módulo de envolvente, al valor hallado se le suma el valor de 0.75 que corresponde al valor mínimo de la entrada del sintetizador.

**Figura 4-42** Selector de arreglos para valores de amortiguamiento el valor de la parte izquierda corresponde al valor del knob de amortiguamiento de usuario.



*Fuente: Imagen Original*

**Figura 4-43** Detalle de calibración del valor de amortiguamiento.



*Fuente: Imagen Original*

#### 4.4.7 Módulo de la envolvente.

Al tener los valores, éstos ingresan al módulo de generación de envolvente que se encarga de convertir los valores de amortiguamiento, amplitud y tiempo en la modulación del armónico, el módulo posee 4 entradas que corresponden a los valores de amplitud, tiempo de decaimiento y constante de amortiguamiento. La salida corresponde al sonido final del armónico.

**Figura 4-44** Módulo de envolvente

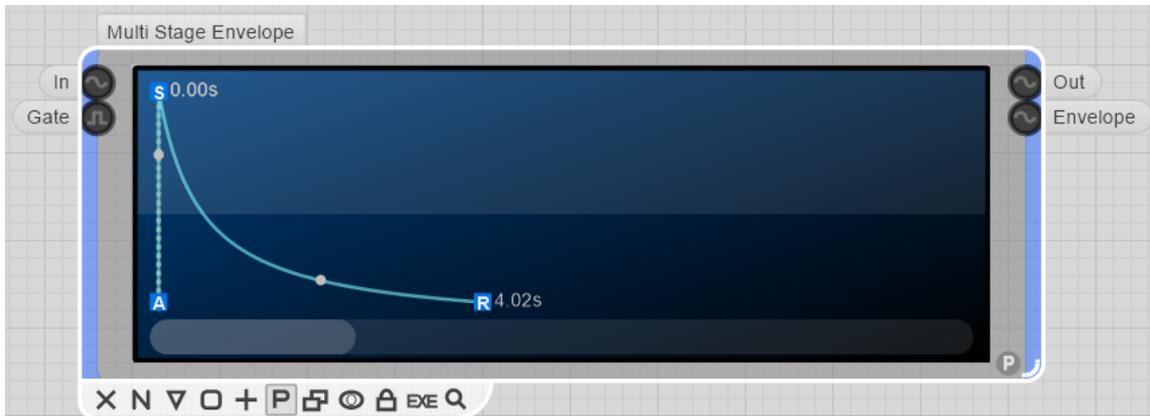


*Fuente: Imagen Original*

Éste módulo está basado en uno de los submódulos internos del *Multi Stage Envelope* que en su composición posee las opciones para caracterizar gráficamente una envolvente ADSR. Para caracterizar la envolvente del instrumento, se tomó el módulo que convierte la interfaz gráfica en valores numéricos que determinan la envolvente acústica.

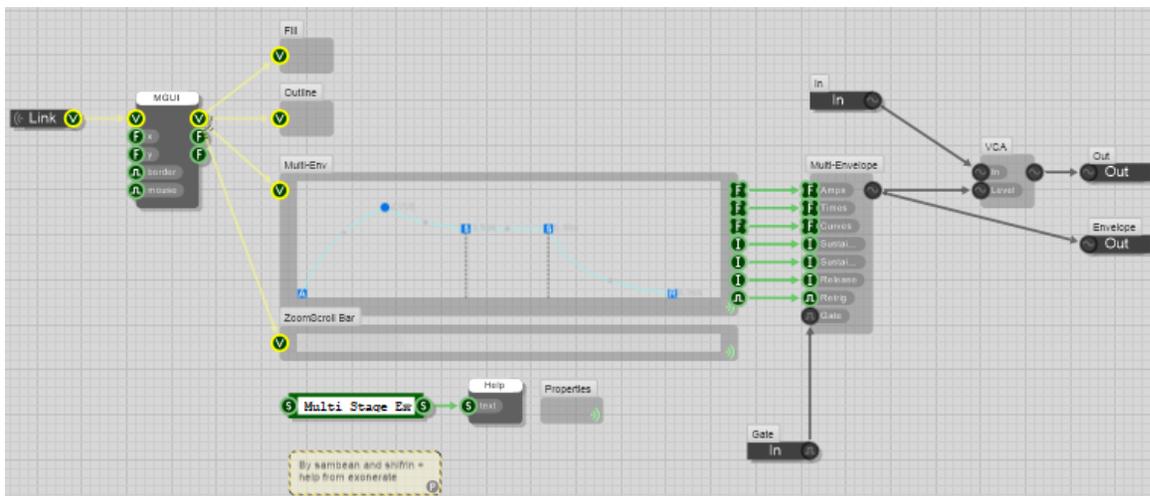
Teniendo en cuenta que las envolventes acústicas halladas son funciones exponenciales decrecientes, se adaptó éste módulo de manera el ataque es una pendiente de 90 grados y el decay corresponde a la función exponencial decreciente calculada, logrando así la envolvente deseada.

**Figura 4-45** Módulo Multi-Stage Envelope



*Fuente: Imagen Original*

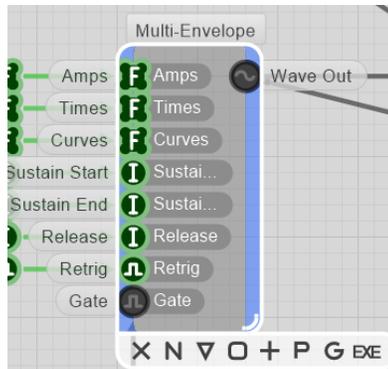
**Figura 4-46** Composición Interna del módulo Multi Stage Envelope



*Fuente: Imagen Original*

El módulo posee 3 matrices que contienen 5 valores flotantes y 3 valores enteros de entrada. Para modelar la envolvente deseada, solo se necesita un ataque y un decay, por lo tanto se necesitan valores constantes en las entradas de Sustain Start, Sustain End, Retrig y Release.

**Figura 4-47** Submódulo Multienvolope



*Fuente: Imagen Original*

Para la matriz Amps los valores del arreglo son:

$A = 0$ ,  $B =$  Valor de la amplitud del armónico,  $C = 0$ ,  $D = 1$ ,  $E = 0$ .

Para la matriz Times los valores del arreglo son:

$A = 0$ ,  $B =$  Valor del tiempo de decaimiento del armónico,  $C = 0$ ,  $D = 1706.61$ ,  $E = 689.063$ . Donde un segundo equivale al valor de 347.741.

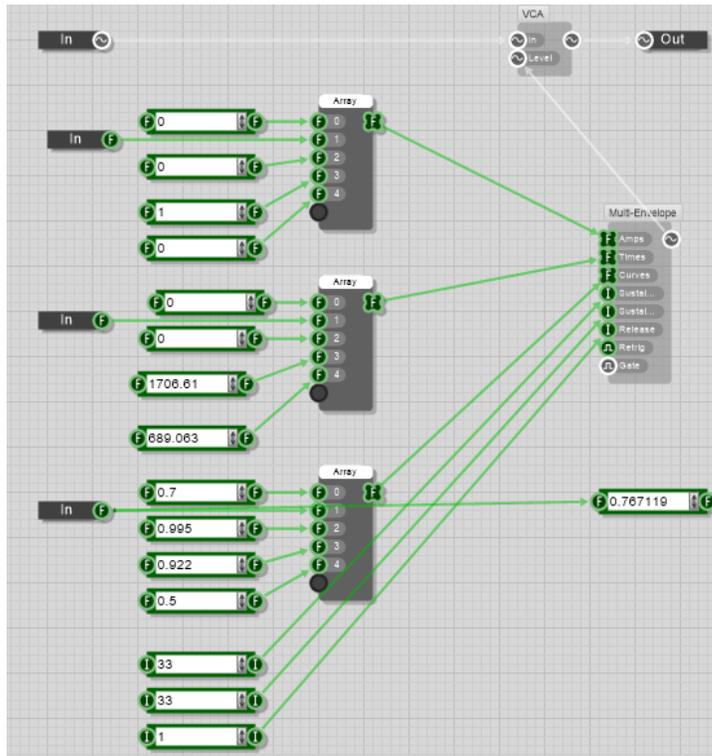
Para la matriz Curves los valores del arreglo son:

$A = 0.7$ ,  $B =$  Valor calibrado de 0.995 a 0.75 del valor de amortiguación,  $C = 0.995$ ,  $D = 0.922$ ,  $E = 0.5$

Para Sustain Start el valor es 33, para Sustain End el valor es 33 y para Release el valor es 1.

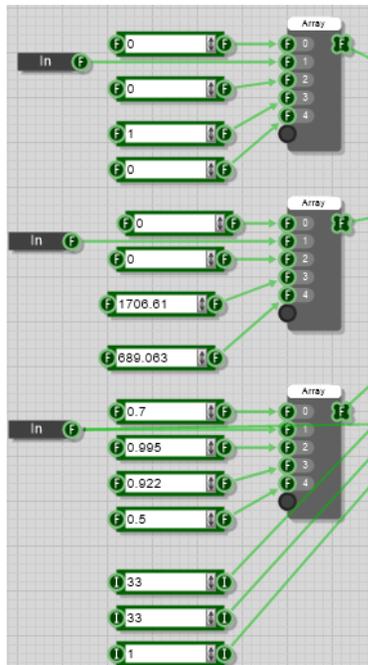
Finalmente la salida de este módulo se conecta a un VCA (Voltage Control Amplifier) cuya entrada es la onda senoidal modulada por la envolvente resultante.

**Figura 4-48** Construcción interna del módulo envolvente.



*Fuente: Imagen Original*

**Figura 4-49** Detalle de valores para los arreglos



*Fuente: Imagen Original*

#### 4.4.8 Reverb

En la construcción del sintetizador se implementó un módulo de reverberación para que el usuario tenga la opción de darle sensación de espacialidad al sonido del instrumento.

**Figura 4-50** Reverberación



*Fuente: Imagen Original*

Los parámetros que el usuario puede modificar para darle la noción de espacialidad al sonido del instrumento son:

**Room:** Aumenta o disminuye el tamaño de la sala caracterizada en el efecto de reverb.

**Width:** Aumenta o disminuye el espacio estéreo de la sala caracterizada en el efecto de reverb.

**Mix:** Aumenta o disminuye la señal que ingresa desde el sonido original del sintetizador al efecto de reverb.

#### 4.4.9 Interfaz gráfica

La interfaz gráfica de usuario consta del knob de porcentaje de amortiguamiento, los 3 controles de la reverberación y un módulo para visualizar la onda de la nota tocada.

**Figura 4-51** Interfaz gráfica de usuario



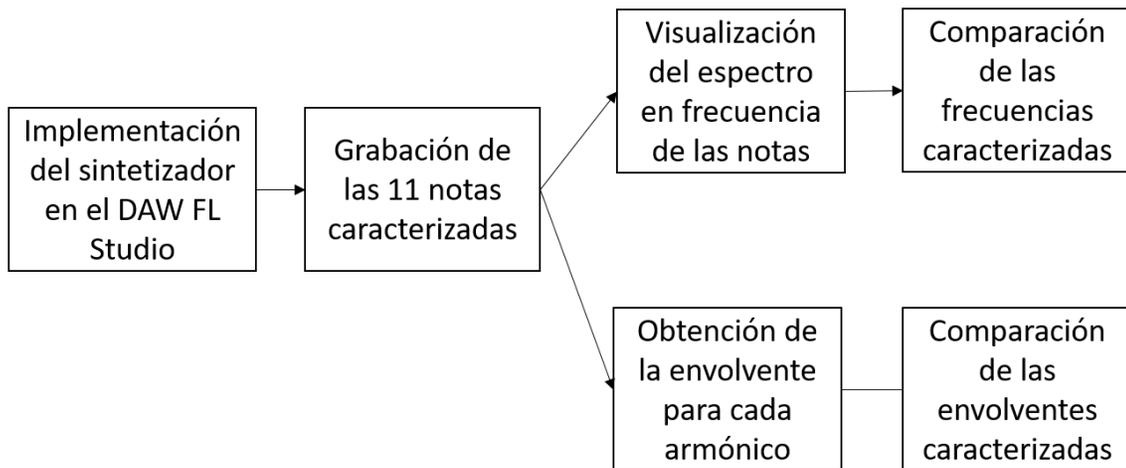
*Fuente: Imagen Original*

## 5 Capítulo V: Pruebas y resultados

### 5.1 Pruebas

Se realizó el siguiente procedimiento para implementar y hacer pruebas en el sintetizador.

**Figura 5-1** Fases del procedimiento de prueba.



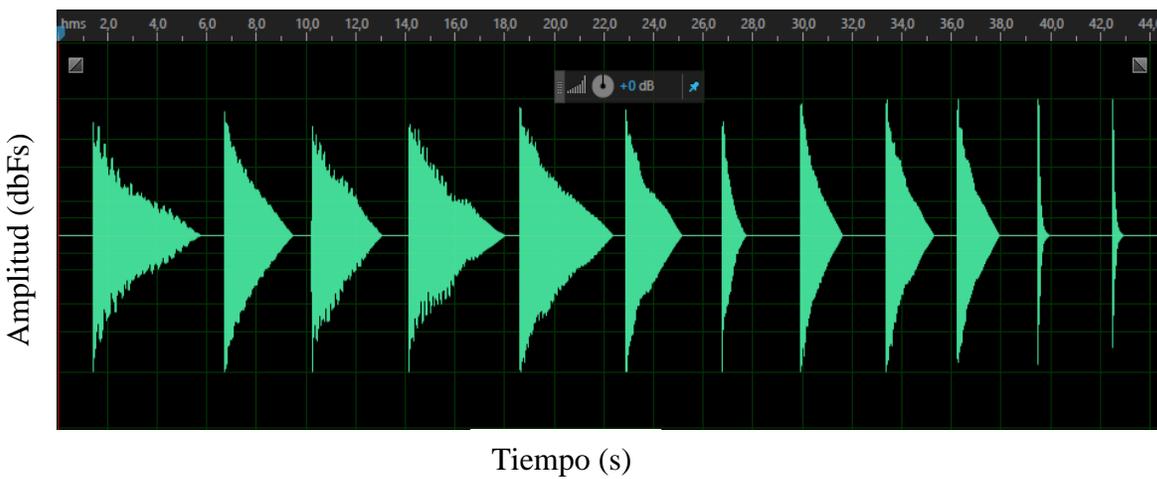
*Fuente: Imagen Original*

**Figura 5-2** Implementación del sintetizador en FL Studio



*Fuente: Imagen Original*

**Figura 5-3** Notas del sintetizador grabadas.

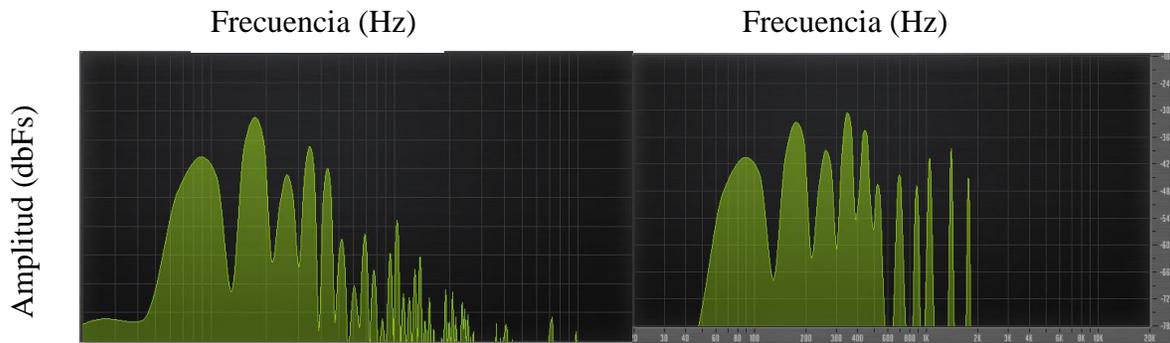


*Fuente: Imagen Original*

## 5.2 Resultados

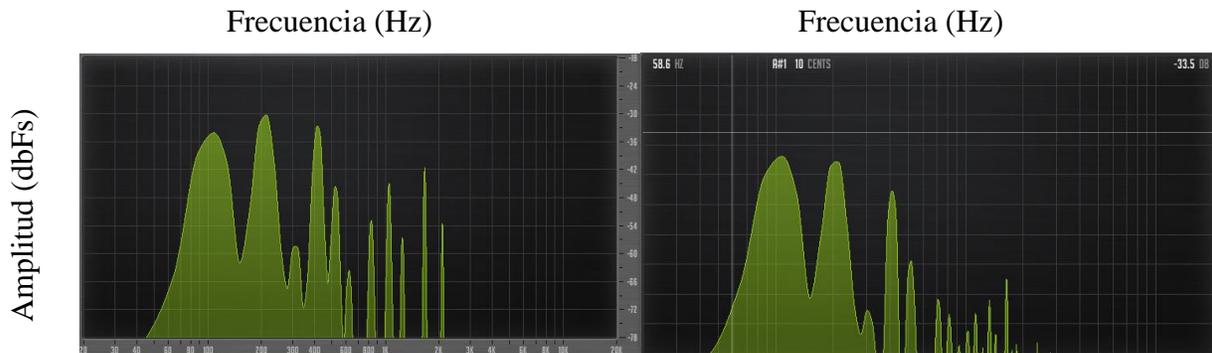
### 5.2.1 Espectro en frecuencia de las notas obtenidas en el sintetizador comparado con el espectro en frecuencia de las notas originales

**Figura 5-4** Espectro en frecuencia del sintetizador vs espectro original de la nota F2



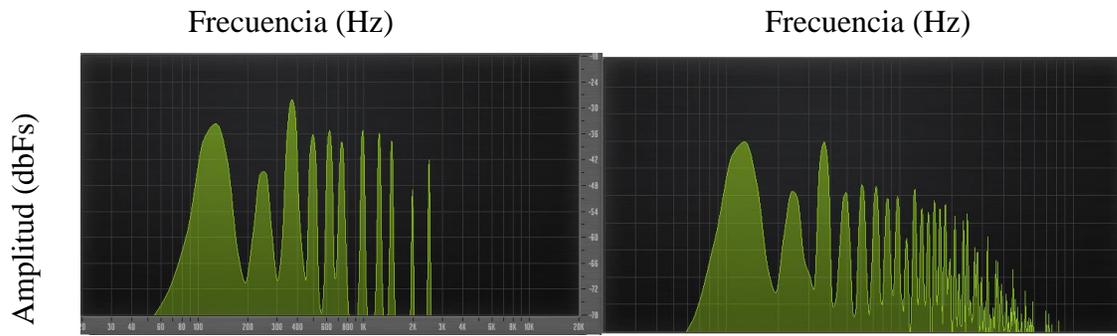
*Fuente: Imagen Original*

**Figura 5-5** Espectro en frecuencia del sintetizador vs espectro original de la nota G#2



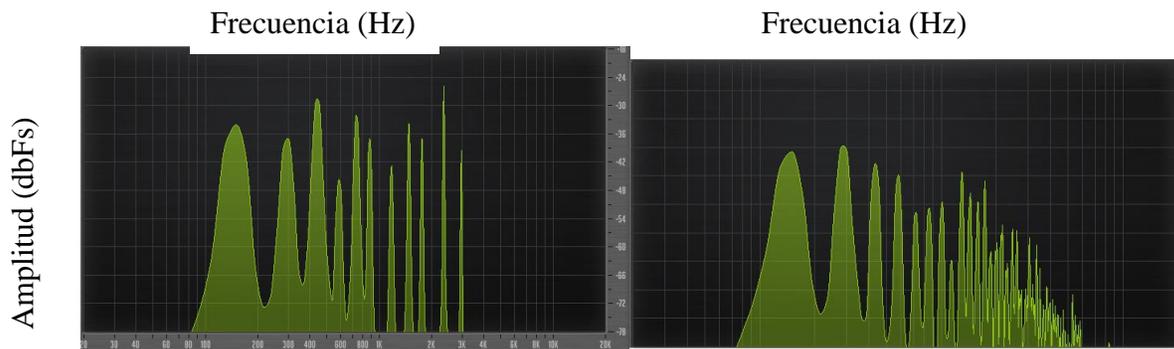
*Fuente: Imagen Original*

**Figura 5-6** Espectro en frecuencia del sintetizador vs espectro original de la nota B2



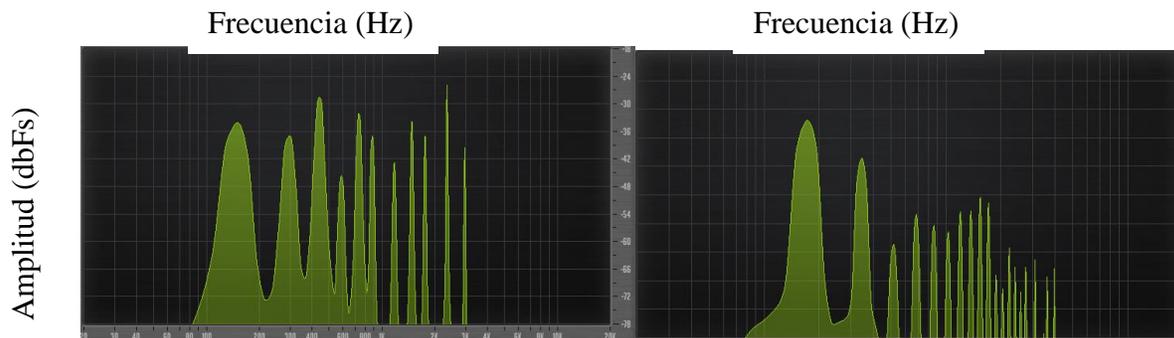
*Fuente: Imagen Original*

**Figura 5-7** Espectro en frecuencia del sintetizador vs espectro original de la nota D3



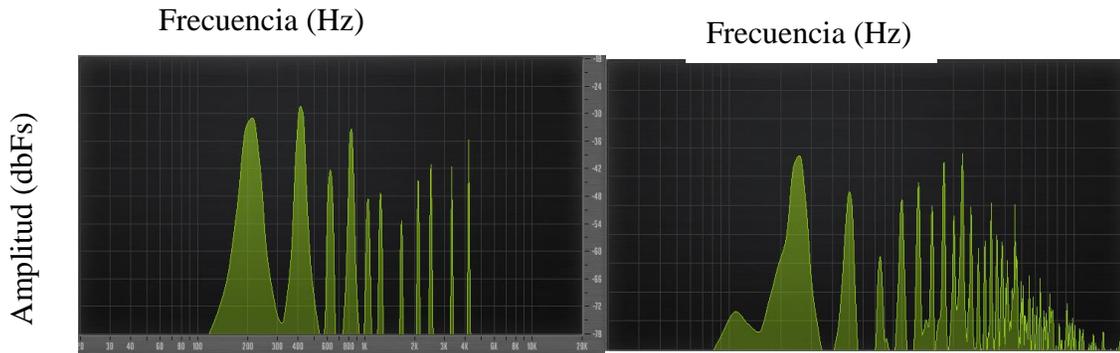
*Fuente: Imagen Original*

**Figura 5-8** Espectro en frecuencia del sintetizador vs espectro original de la nota F3



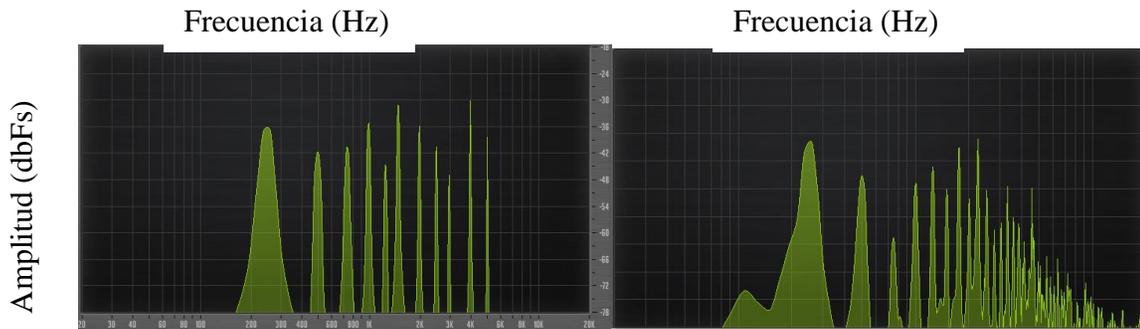
*Fuente: Imagen Original*

**Figura 5-9** Espectro en frecuencia del sintetizador vs espectro original de la nota G#3



*Fuente: Imagen Original*

**Figura 5-10** Espectro en frecuencia del sintetizador vs espectro original de la nota B3



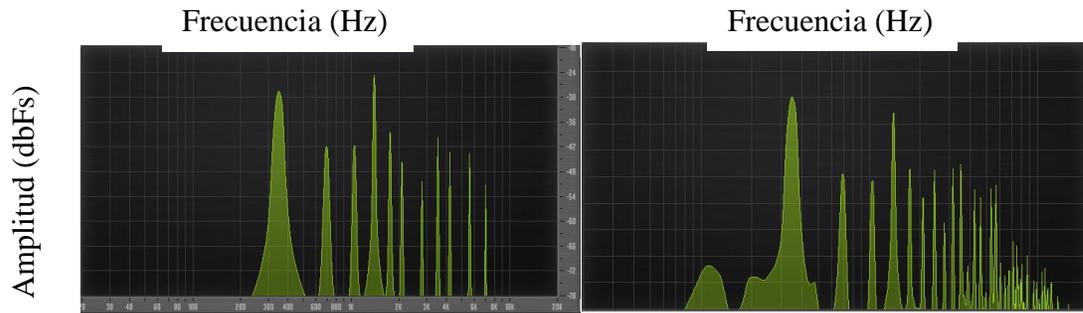
*Fuente: Imagen Original*

**Figura 5-11** Espectro en frecuencia del sintetizador vs espectro original de la nota D4



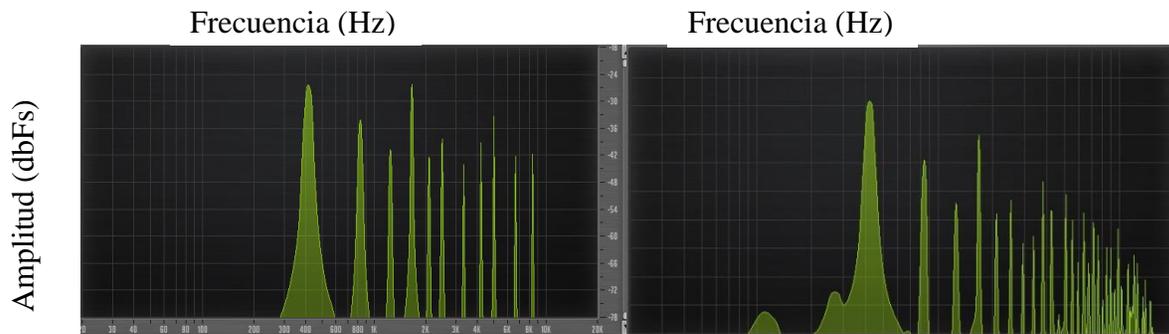
*Fuente: Imagen Original*

**Figura 5-12** Espectro en frecuencia del sintetizador vs espectro original de la nota F4



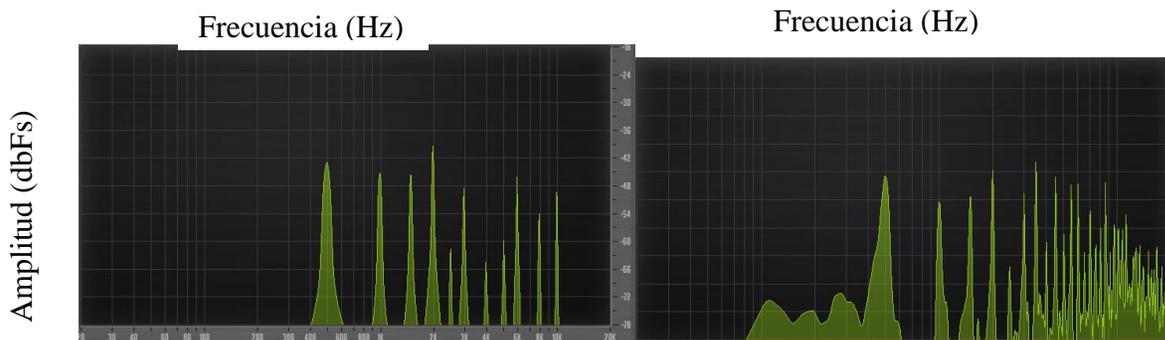
*Fuente: Imagen Original*

**Figura 5-13** Espectro en frecuencia del sintetizador vs espectro original de la nota G#4



*Fuente: Imagen Original*

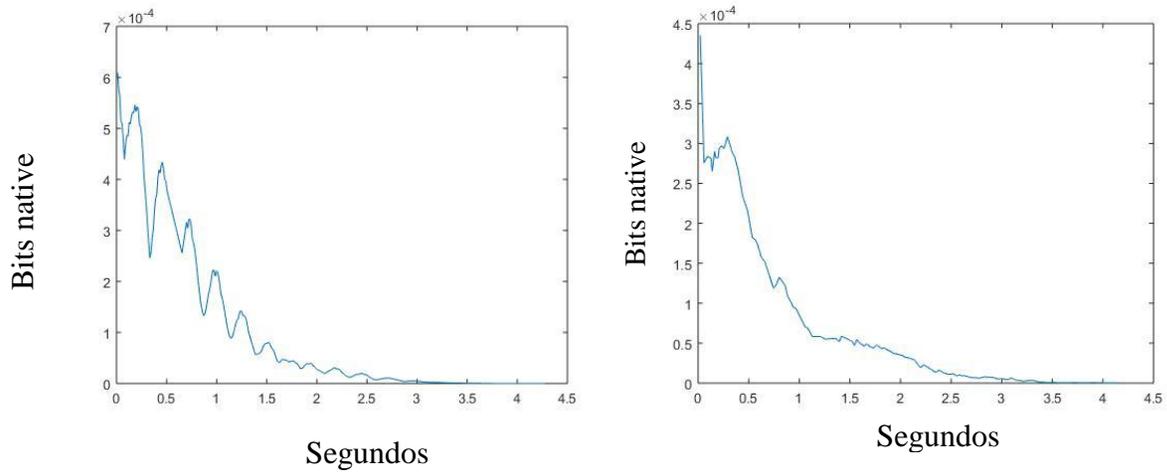
**Figura 5-14** Espectro en frecuencia del sintetizador vs espectro original de la nota B4



*Fuente: Imagen Original*

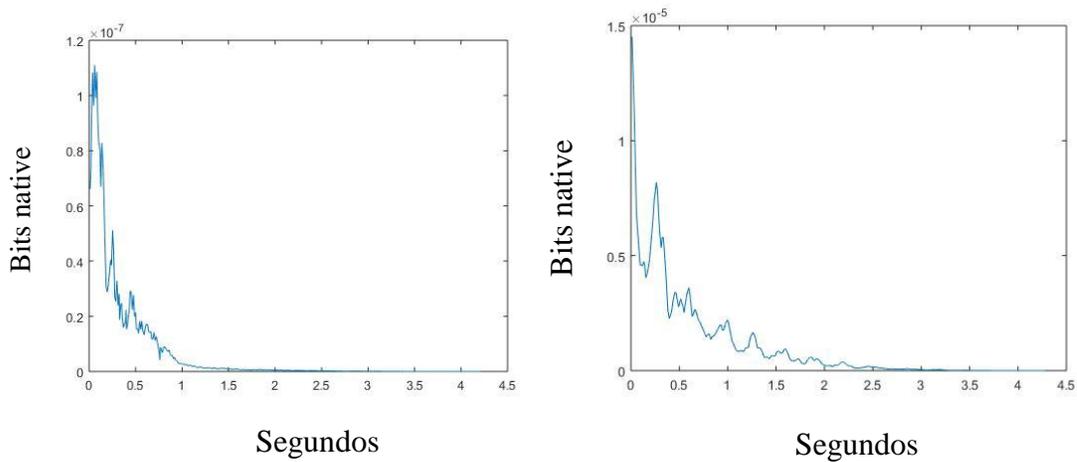
### 5.2.2 Envoltentes original y caracterizada de las notas

**Figura 5-15** Envoltentes original y caracterizada para el primer armónico de F2.



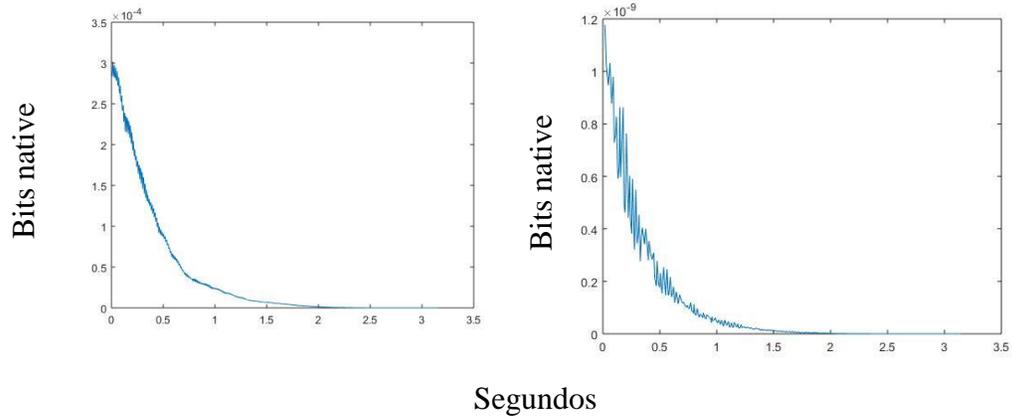
*Fuente: Imagen Original*

**Figura 5-16** Envoltentes original y caracterizada para el décimo armónico de F2



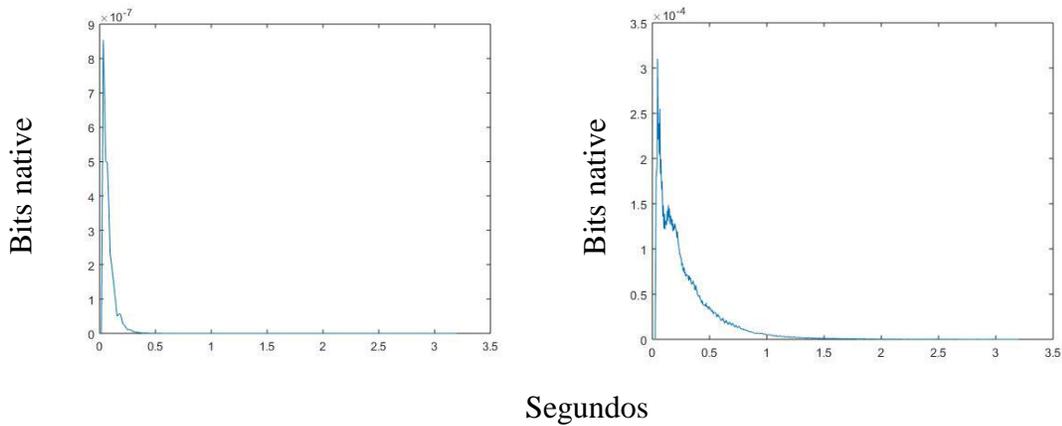
*Fuente: Imagen Original*

**Figura 5-17** Envolventes original y caracterizada para el primer armónico de G#3.



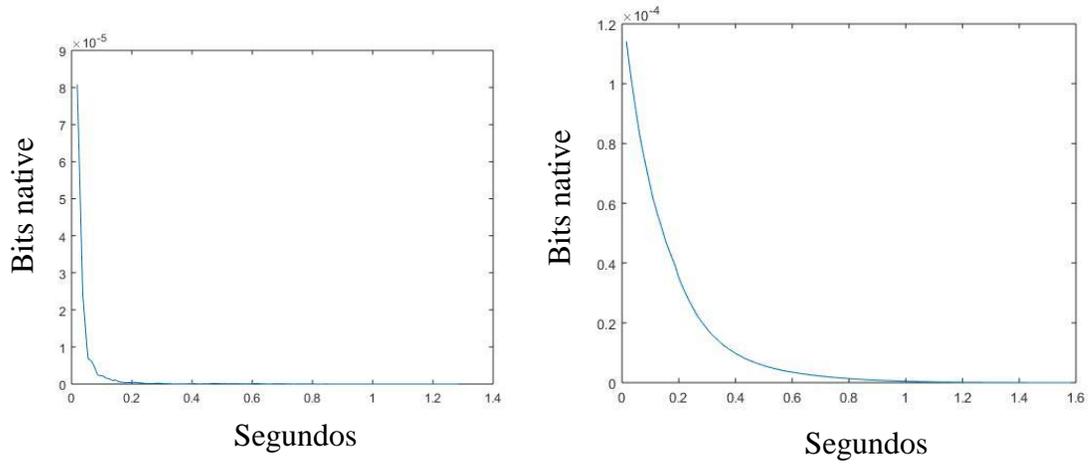
*Fuente: Imagen Original*

**Figura 5-18** Envolventes original y caracterizada para el décimo armónico de G#3.



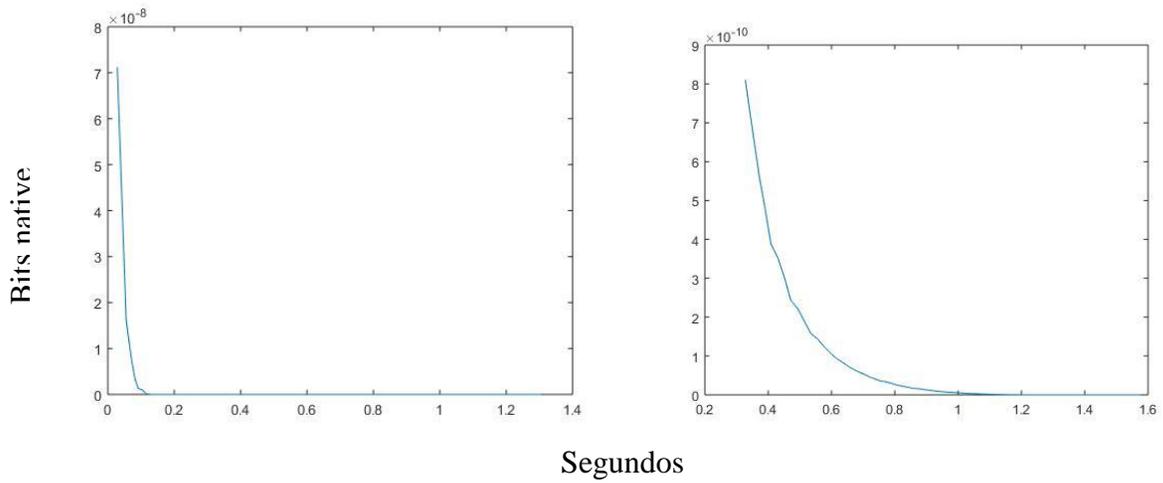
*Fuente: Imagen Original*

**Figura 5-19** Envolventes original y caracterizada para el primer armónico de B4



*Fuente: Imagen Original*

**Figura 5-20** Envolventes original y caracterizada para el décimo armónico de B4:



*Fuente: Imagen Original*

## 6 Capítulo VI: Discusión

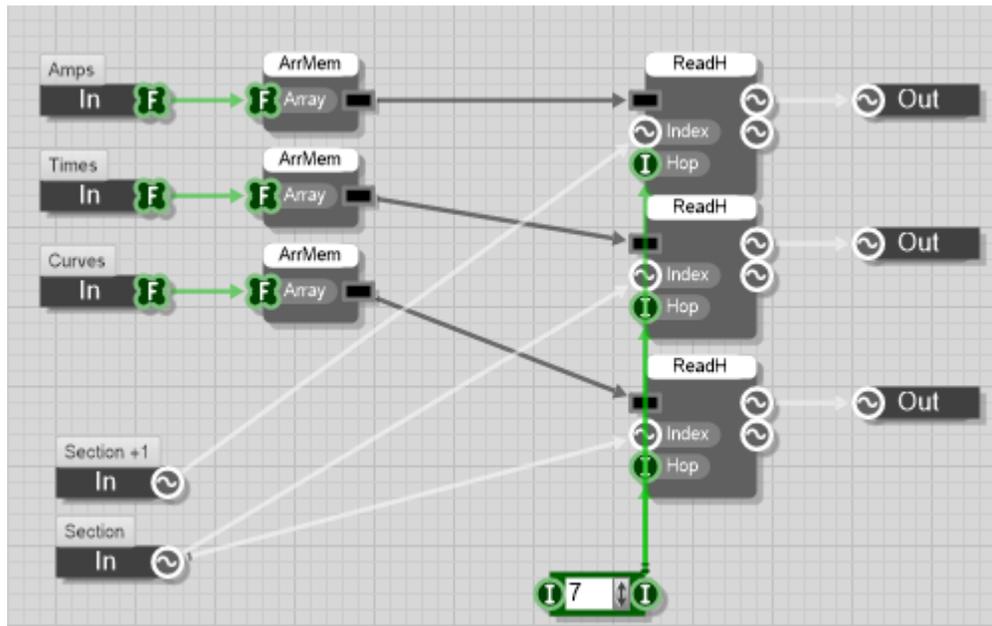
Basado en los resultados obtenidos se puede apreciar que las frecuencias resonantes de la señal del sintetizador coinciden con muchas de las frecuencias resonantes de la señal original logrando el objetivo de caracterizar la guitarra digitalmente en el dominio de frecuencia aunque se evidencian diferencias de amplitud debido a la caracterización computacional del sintetizador.

Basado en la comparación entre la envolvente de los armónicos para el sonido original y la envolvente del sonido obtenido del sintetizador se puede evidenciar una diferencia notable en las envolventes.

Un factor importante que influye en la caracterización digital de la envolvente es la configuración computacional de la función que modela la envolvente en el Flowstone. Internamente, la función está constituida por módulos que convierten los valores de cada arreglo flotante en un buffer de memoria a través del módulo ArrMem, éste buffer es leído a través de la función Readh que al recibir el buffer de memoria convierte los valores de entrada en Streams caracterizando computacionalmente la envolvente cada 128 muestras, éste número de muestras se define a través de la entrada Hop de cada módulo, se escogió el valor de 7 ( $2^7=128$ ), ya que si es un valor menor sería una carga computacional muy elevada para el computador.

Basado en el margen de error entre la señal original y la señal caracterizada se puede inferir que se necesitarían más muestras que definan tanto la envolvente como la onda resultante.

**Figura 6-1** Módulo para la envolvente



*Fuente: Imagen Original*

Otro factor a tener en cuenta es que este tipo de sistemas tienen un tiempo de decaimiento relativamente corto y hay que realizar aproximaciones matemáticas para tiempos que no superan los 5 segundos, para el caso de las frecuencias altas hay muchos armónicos que no superan el segundo, esto también representa otro factor en la dificultad para caracterizar matemática y computacionalmente la envolvente de cada armónico

## 7 Capítulo VII: Conclusiones y recomendaciones

### 7.1 Conclusiones

En el desarrollo para cumplir con el objetivo de obtener las características armónicas de la guitarra acústica (Amplitud, Frecuencia, Fase), para una sola octava, en las seis cuerdas de la guitarra, se puede concluir lo siguiente:

- Al hallar las características armónicas del instrumento grabado se puede concluir que la amplitud de cada armónico decrece en el tiempo, la frecuencia fundamental es la que tiene un valor energético mayor con respecto a los demás armónicos cuyo valor en amplitud máxima decrece a medida que el número de cada armónico aumenta, la fase es un valor que no se halló para los armónicos ya que al implementar el valor de fase en el sintetizador solo se experimentan variaciones sonoras si los osciladores que se suman tienen la misma frecuencia.
- A pesar de ser la misma nota, el contenido armónico del sonido para cada nota varía dependiendo del material de la cuerda, éste fue un criterio que no se tuvo en cuenta para escoger las notas a caracterizar.
- El método diseñado e implementado para hallar las características armónicas del instrumento cumplió con las expectativas y es aplicable para cualquier caso de análisis armónico para instrumentos musicales donde se requiera hallar el comportamiento energético de sus armónicos a través del tiempo.
- Cuando se implementó la STFT se hicieron varias pruebas con diversas longitudes y overlaps en la ventana, en estas pruebas se pudo concluir que con una longitud menor se obtiene una mayor resolución para caracterizar cada armónico.
- Observando el espectro en frecuencia de la señal para la guitarra en todas las notas, hay contenido no armónico con una amplitud significativa que no se caracterizó en el sintetizador y que puede influir en la caracterización del sonido.

En el desarrollo para cumplir con el objetivo de parametrizar las ecuaciones de movimiento amortiguado para obtener datos de entrada y de salida para controlar el sintetizador por amortiguación y por masa se pudo concluir lo siguiente:

- La solución matemática del sistema subamortiguado que corresponde a una función exponencial decreciente que modula una función oscilatoria es análoga al comportamiento de decaimiento exponencial correspondiente al Audio Decay Time.
- Aproximar el comportamiento del decaimiento de la amplitud para cada armónico a una ecuación exponencial decreciente es funcional para caracterizar la envolvente de instrumentos de cuerda pulsada, ya que al implementar éste modelo en el sintetizador se obtiene un sonido que se asemeja al de una cuerda pulsada.
- El método de la regresión exponencial implementado para hallar el coeficiente de amortiguamiento y el tiempo de decay se puede utilizar para hallar las características del decaimiento, no solo para instrumentos musicales, sino también para cualquier problema en el campo de la acústica donde haya decaimiento exponencial de la presión sonora.

En el desarrollo para cumplir con el objetivo de diseñar y programar una aplicación con el timbre del instrumento, teniendo en cuenta sus características oscilatorias en el programa synthmaker, se pudo concluir lo siguiente:

- Como se puede observar en los resultados obtenidos, la envolvente del sonido grabado y la envolvente del sonido del sintetizador difieren, ya que la representación digital de la envolvente está condicionada por la plataforma donde se caracterizó. Para este proyecto, el módulo de creación de envolvente contempla variables computacionales como el tamaño en bits para el buffer de la memoria que determina cada cuántas muestras se caracteriza la envolvente.
- El fader de amortiguamiento es un módulo que modifica el sonido del sintetizador de manera notable, aumentando o disminuyendo el tiempo de decaimiento y la curva de la envolvente
- El sonido del sintetizador asemeja el sonido real de una guitarra en las notas más graves, al tocar las notas más agudas el sonido se hace más difícil de caracterizar.
- Se tomaron 11 armónicos para caracterizar el sintetizador, los armónicos más agudos decaen más rápido pero su sonido sobresale y suena como si fuese un tono aparte, lo que quiere decir que con menos armónicos también se puede lograr una gran aproximación al sonido de la guitarra.
- El proyecto contempla como objeto de estudio el sonido de la guitarra grabado desde un micrófono de alta precisión y se hace la analogía con un sistema masa-resorte a partir de éste sonido, en los modelos vistos en la revisión bibliográfica se toman los parámetros físicos a

partir de su construcción física, (volumen y medidas de la caja de resonancia, caracterización física del puente, de las cuerdas y otros parámetros físicos) éstos pueden ser factores que al ser modelados computacionalmente cambien el sonido de la guitarra.

## 7.2 Recomendaciones

- El análisis hecho con la STFT para la guitarra es aplicable para cualquier instrumento musical y para el cual se necesite hacer el análisis de cada componente en frecuencia a través del tiempo
- Se tomó una gran cantidad de valores tanto de tiempo de decaimiento, constantes de amortiguación y amplitud, por lo tanto se pueden hacer varios presets de sintetizadores con sonidos distintos con estos valores, teniendo en cuenta que son 11 caracterizaciones armónicas para lograr sonidos diferentes.
- Una futura etapa para éste proyecto o la base para otro, sería la implementación análoga del decaimiento exponencial en un oscilador.

## 8 Capítulo VIII: Referencias

Carlos Platero. Universidad Politécnica de Madrid departamento de electrónica, automática e informática industrial Capítulo 12: Introducción al procesamiento digital de señales (2010).

Recuperado de:

[Http://www.elai.upm.es/webantigua/spain/publicaciones/pub01/intro\\_procsdig.pdf](http://www.elai.upm.es/webantigua/spain/publicaciones/pub01/intro_procsdig.pdf)

John Eargle. The Microphone Book (2005)

Emilia Gómez Gutiérrez. Síntesis aditiva síntesis I processament DEL so i departament de sonologia escola superior DE musica DE catalunya curso 2009-2010

Recuperado de: <http://www.dtic.upf.edu/~egomez/teaching/sintesi/sps1/tema5-aditiva.pdf>

Matlab, Análisis de datos (2016)

Recuperado de: [http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/datos/regresion/regresion\\_1.html](http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/datos/regresion/regresion_1.html)

Native Instruments (2014)

Recuperado de: <http://www.ni.com/support/esa/cvi/analysis/analy3.htm>

Excel Free Blog (2015)

Recuperado de: <https://www.excelfreeblog.com/pronostico-con-tendencia-exponencial-en-excel/>

Interfaz Música (2011)

Recuperado de: <https://interfazmusica.blogspot.com.co/2011/02/que-es-pitch.html>

Future Music (2010)

Recuperado de: <http://www.futuremusic-es.com/que-son-los-plugins-vst/>

Hyperphysics (2010)

Recuperado de: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/hframe.html>

Sandler, Mark B. (1989). Auto regressive modelling AND synthesis OF acoustic instruments.

Affiliation: King's college london, london, England.

Acerca de Ruby

Recuperado de: <https://www.ruby-lang.org/es/about/>

Maher, Robert C. (1991). Sinewave additive synthesis revisited. Affiliation: University OF Nebraska - Lincoln, Lincoln, Ne

Cristian García Bauza, Pablo Lotito, Lisandro Parente, Marcelo Vénere (2009). Mecánica Computacional Vol XXVIII

Wang, Gun; Ge, Hongya; Ding, Yinong May (2001). Adaptive parametric schemes for analysis and synthesis of musical signals

Le Brun, Marc. Digital waveshaping synthesis. (1979) Affiliation: center FOR computer research IN music AND acoustics, stanford university, stanford, ca  
jaes volume 27 issue 4 PP. 250-266;

De poli, Giovanni Sound. Synthesis BY fractional waveshaping

Affiliation: universitd DI padova, c.s.c. Istituto DI elettrotecnica E DI elettronica, 35131 padua, italy

Rodet, X.; Depalle. Spectral envelopes and inverse fft synthesis. Aes convention:93 (1992), P.

Affiliation: Ircam, Paris, France

Sandler, Mark b. Aes convention:89 (1990) New results IN lpc synthesis of drums Affiliation: kings college london, london, england paper number:2951

Reiss, Joshua; Hendry, Aes convention: 129 (2010) Simon Physical modeling AND synthesis OF motor noise for replication OF A sound effects library. Queen mary university OF london, london, uk paper number:8218

Julius O. Smith III Physical Audio Signal Processing: for Virtual Musical Instruments and Audio Effects (2011): Volume 3

Sears, Semanski, Física. (1964) Edición Original

James Stewart, Cálculo, conceptos y contextos.(2006) Tercera edición.

Alicia Guerrero de Mesa. Oscilaciones y Ondas (2005). Notas de clase Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Física, Facultad de Ciencias.

Juan Ricardo Penagos Plazas. Cancelación acústica en tiempo real (2001). Escuela Politécnica Nacional.

Michael Moser, Jose Luis Barros (2009). Ingeniería Acústica, Segunda Edición.

Carrión Isbert, Antoni (1998). Diseño acústico de espacios arquitectónicos.

EBU (2014). R128 Loudness normalization and permitted maximum level of audio signals.

Jorda Puig, Sergi. Audio Digital y MIDI (Completo, 1997)

Recuperado de: <https://es.scribd.com/document/367829223/Jorda-Puig-Sergi-Audio-Digital-y-MIDI-Completo>

Kester Walt, Taking the Mystery out of the Infamous Formula, "SNR = 6.02N + 1.76dB," and Why You Should Care (2009)

Recuperado de: <http://www.analog.com/media/en/training-seminars/tutorials/MT-001.pdf>

Kinsler, Lawrence (2009). Fundamentos de acústica

## A. Anexo A: Análisis dimensional

Ecuación de fuerzas del sistema masa-resorte:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = f(t)$$

La ecuación debe tener unidades de fuerza (Newtons) a los dos lados de la ecuación, el Newton es una unidad de fuerza que corresponde a la multiplicación de masa por aceleración  $f = ma$ , si la unidad de masa corresponde a kilogramos y la de aceleración es la segunda derivada del desplazamiento con respecto al tiempo entonces los Newtons se representan dimensionalmente así:

$$[N] = [kg] \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

Unidades:

Fuerza (f): Newtons( $N$ )

Desplazamiento (x): Metros ( $m$ )

Masa (m): Kilogramos ( $Kg$ )

Tiempo (t): Segundos ( $s$ )

Para que la ecuación fuerzas del sistema masa-resorte tenga equivalencia dimensional:

$$[kg] \left[ \frac{m}{s^2} \right] + \left[ \frac{kg}{s} \right] \left[ \frac{m}{s} \right] + \left[ \frac{kg}{s^2} \right] [m] = [N]$$

Para dejar las constantes de amortiguación (c) en función de los Newtons:

$$\left[ \frac{kg}{s} \right] = \left[ \frac{N \cdot s}{m} \right]$$

Para dejar la constante del resorte (k) en función de los Newtons:

$$\left[ \frac{kg}{s^2} \right] = \left[ \frac{N}{m} \right]$$

Finalmente:

$$[N] + \left[ \frac{N \cdot s}{m} \right] \left[ \frac{m}{s} \right] + \left[ \frac{N}{m} \right] [m] = [N]$$

Para el análisis dimensional de la frecuencia angular  $\omega_0$  y del coeficiente de amortiguamiento  $\gamma$  :

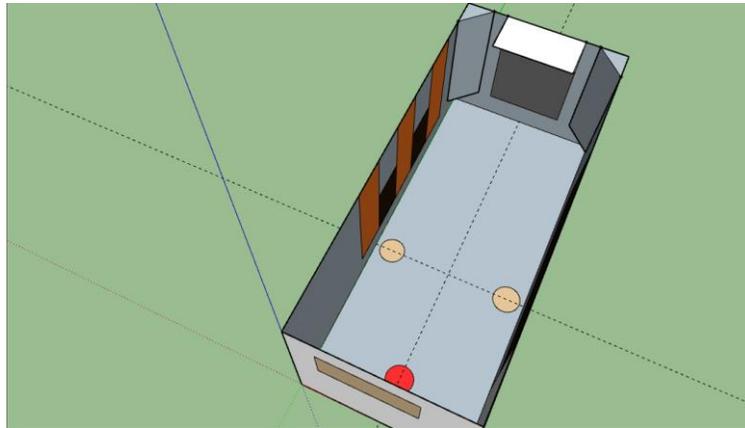
$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\gamma \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0 \text{ donde } \omega_0^2 = \frac{k}{m} \quad y \quad 2\gamma = \frac{c}{m}$$

$$\omega^2 = \frac{k}{m} = \frac{\left[\frac{kg}{s^2}\right]}{[kg]} = [s^{-2}]$$

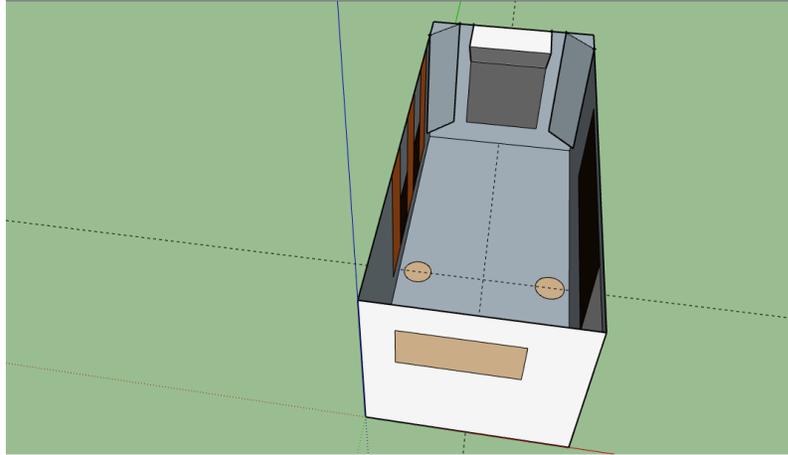
$$2\gamma = \frac{c}{m} = \frac{\left[\frac{kg}{s}\right]}{[kg]} = [s^{-1}]$$

## B. Anexo B: Medición del tiempo de reverberación para el recinto

Basado en la norma ISO 3382-2 se realizó la medición del tiempo de reverberación para la sala de mastering de la Universidad San Buenaventura, se hizo una medición de las dimensiones de la sala para hallar su volumen. Se escogió el método de control que consiste en ubicar micrófonos en dos posiciones de la sala a partir de una posición de una fuente omnidireccional (dodecaedro).



*Fuente: Imagen Original*



*Fuente: Imagen Original*

Medidas del recinto:

Alto=2.28m

Ancho= 2.5m

Largo=5.8m

Volumen del recinto= (2.28m)(2.5m)(5.8m)

Volumen del recinto=33.08m<sup>3</sup>

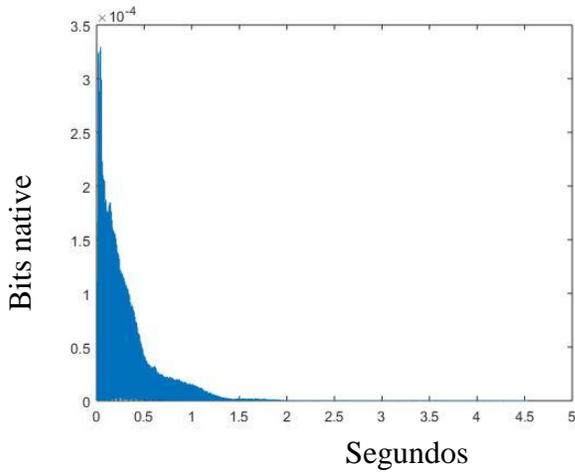
Conforme la norma ISO 3382-2 para un tiempo de reverberación esperado  $\check{T} = 0.2$  segundos la distancia mínima desde la fuente hasta las dos posiciones de micrófono hallada fue:

$$d_{min} = 2 \sqrt{\frac{V}{c\check{T}}}$$
$$d_{min} = 2 \sqrt{\frac{33.08}{343.2 \times 0.2}}$$
$$d_{min} = 1.38 \text{ m}$$

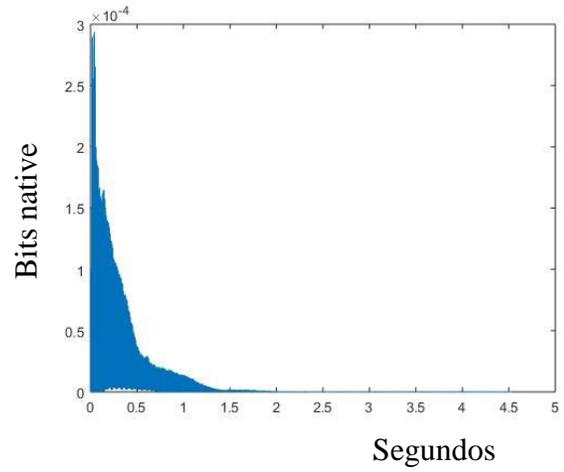
Se escogieron las distancias de 1.38 metros y de 1.58 metros desde la fuente hasta cada micrófono respectivamente

## C. Anexo C: Gráficas de los armónicos

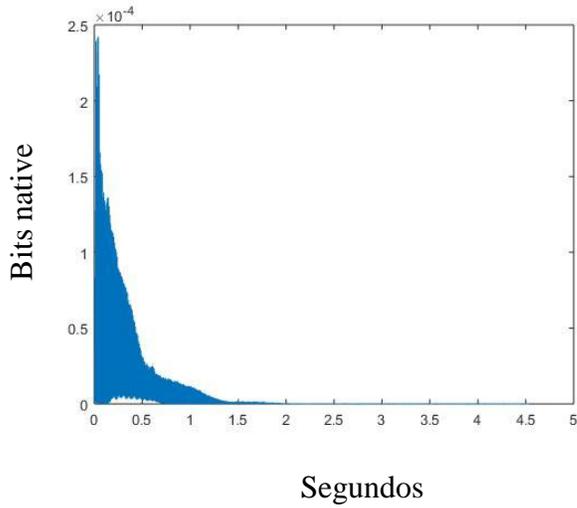
Frecuencia Fundamental B2



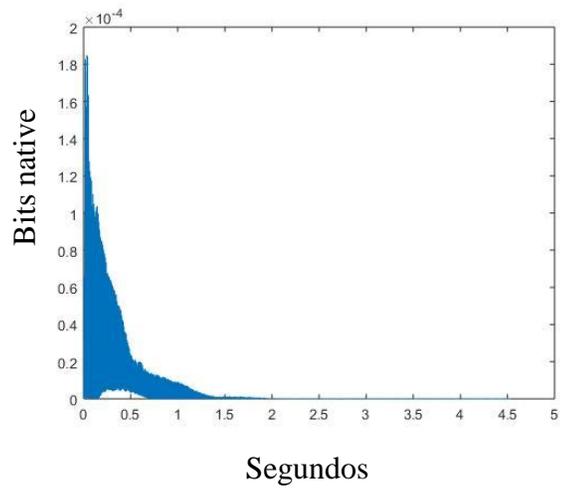
Primer Armónico B2



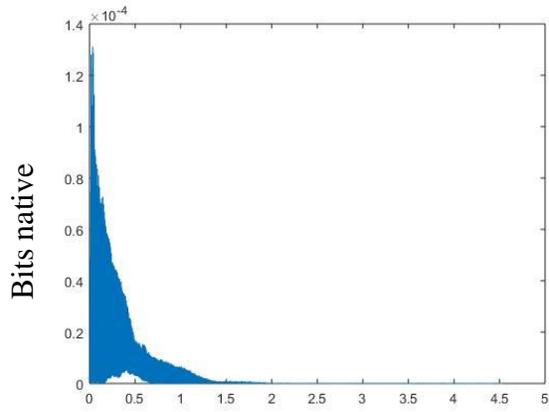
Segundo Armónico B2



Tercer Armónico B2

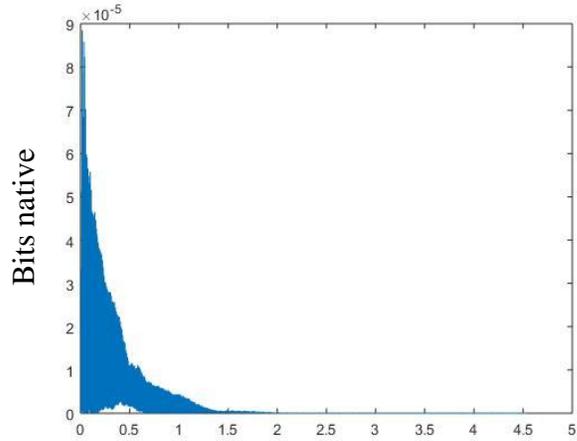


Cuarto Armónico B2



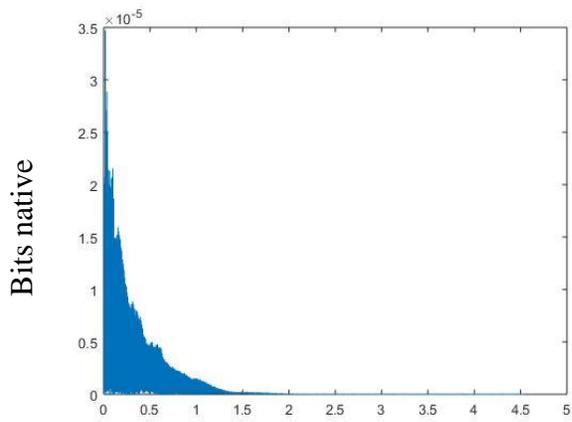
Segundos

Quinto Armónico B2



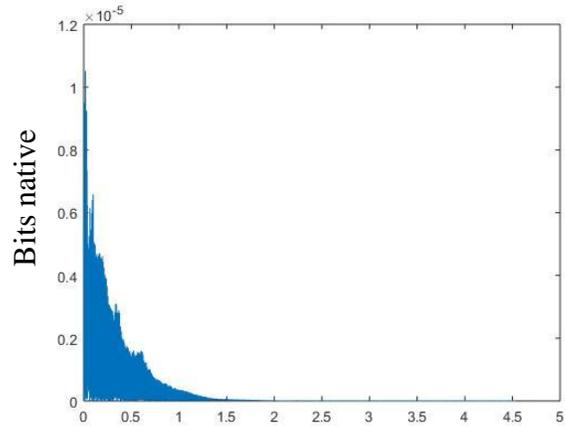
Segundos

Sexto Armónico B2



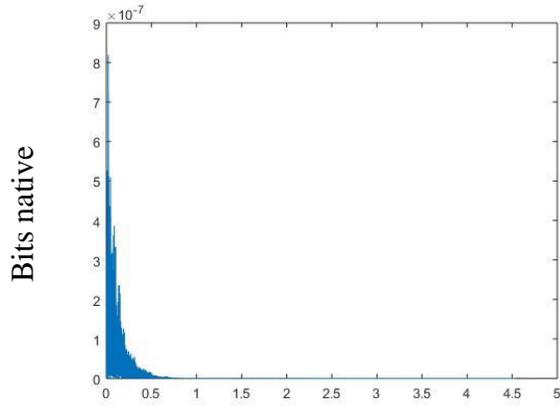
Segundos

Séptimo Armónico B2



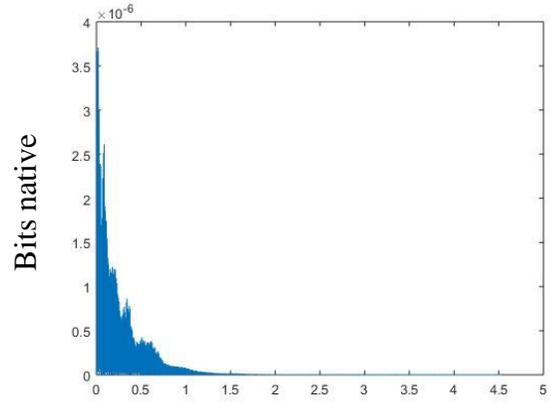
Segundos

Octavo Armónico B2



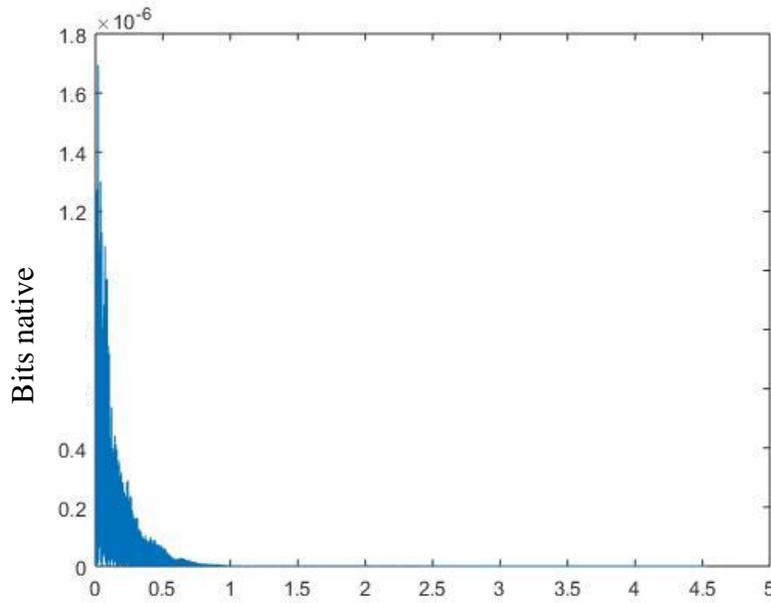
Segundos

Noveno Armónico B2



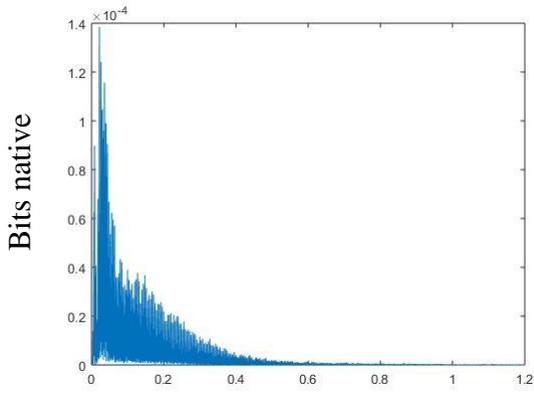
Segundos

Décimo Armónico B2



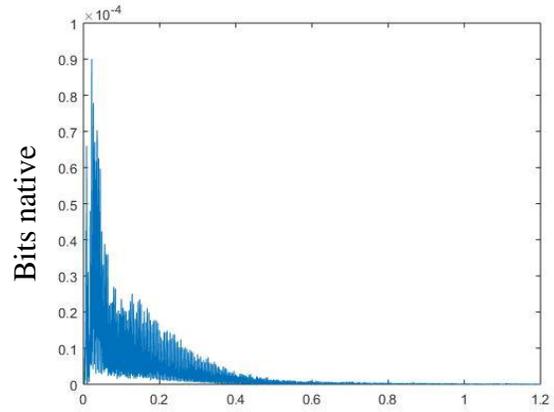
Segundos

Fundamental B3



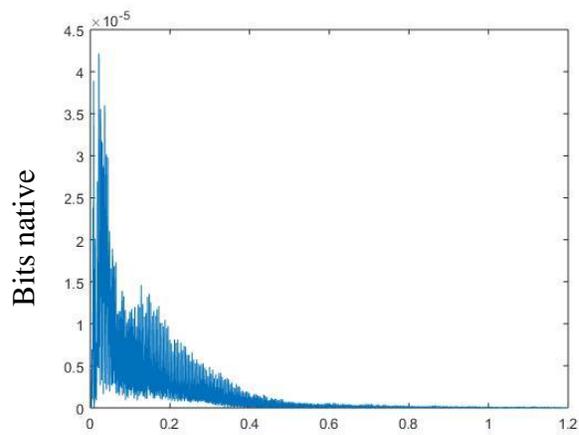
Segundos

Primer Armónico B3



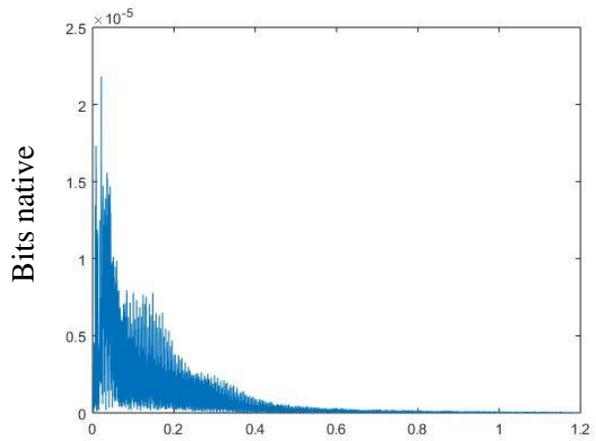
Segundos

Segundo Armónico B3



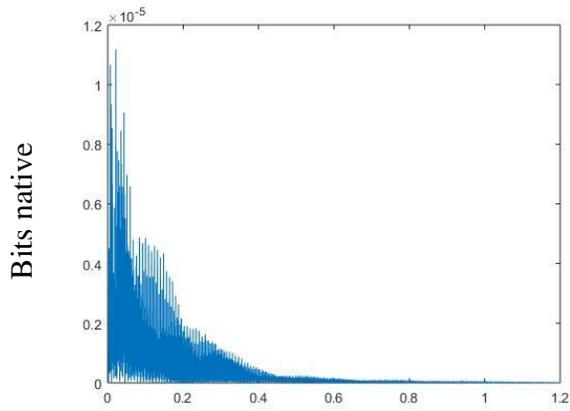
Segundos

Tercer Armónico B3



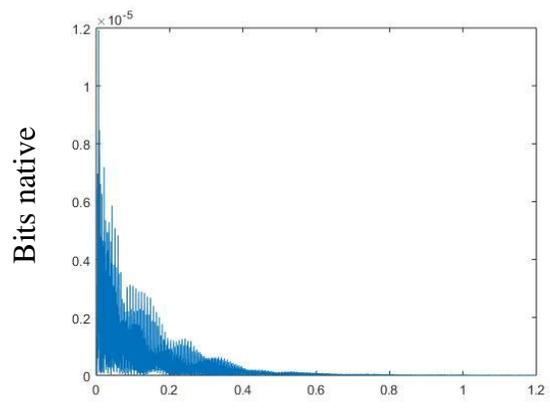
Segundos

Cuarto Armónico B3



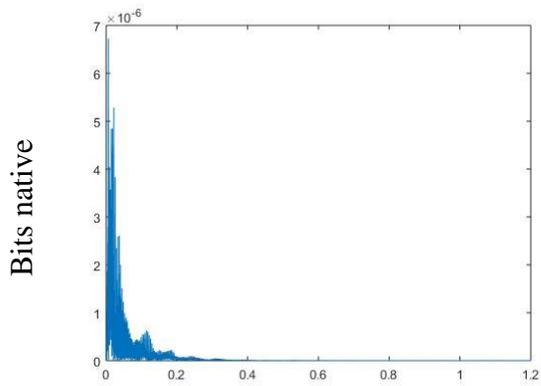
Segundos

Quinto Armónico B3



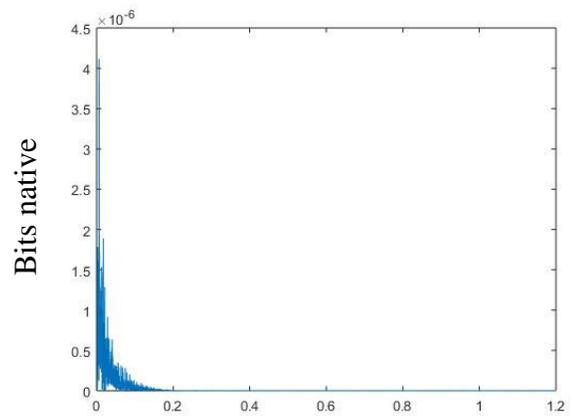
Segundos

Sexto Armónico B3



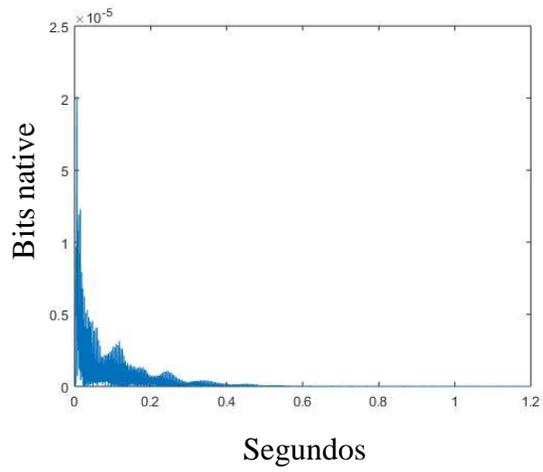
Segundos

Séptimo armónico B3

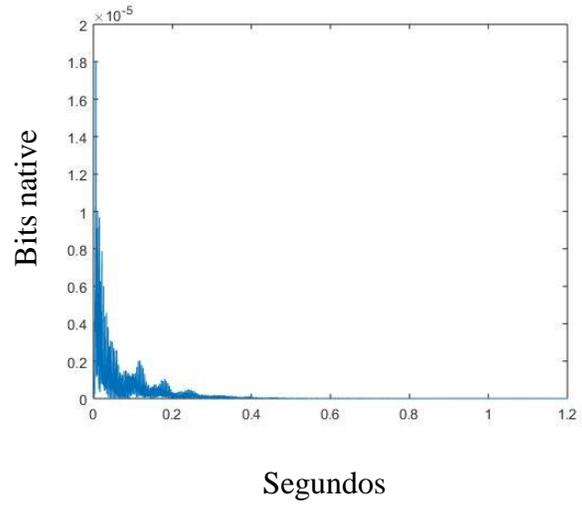


Segundos

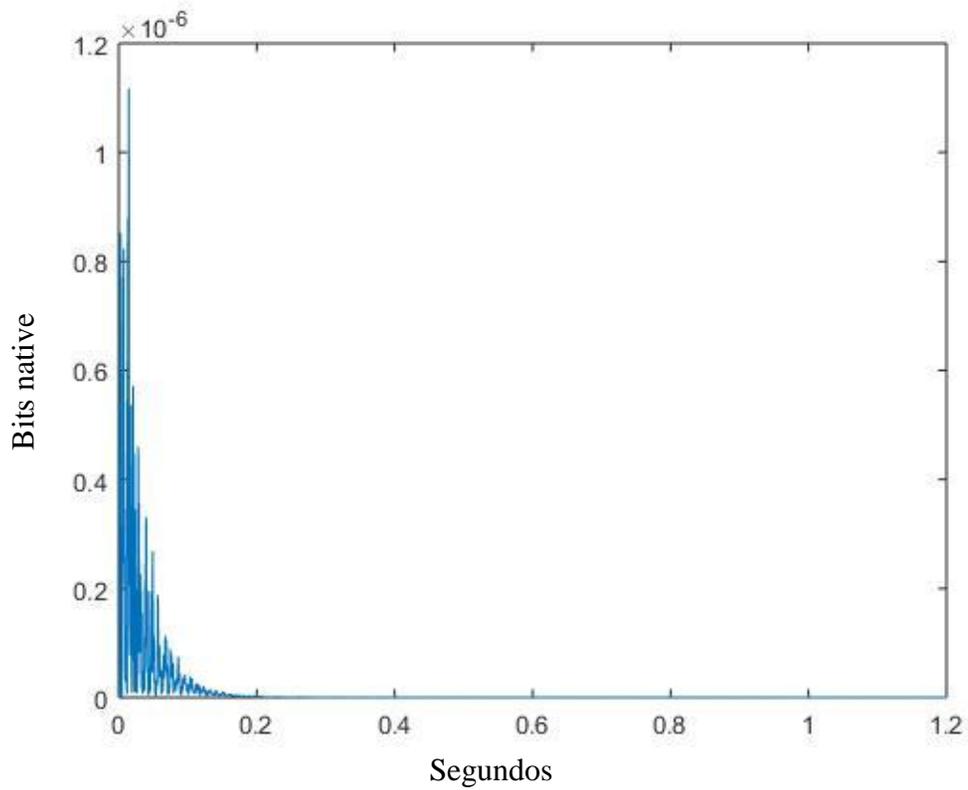
Octavo Armónico B3



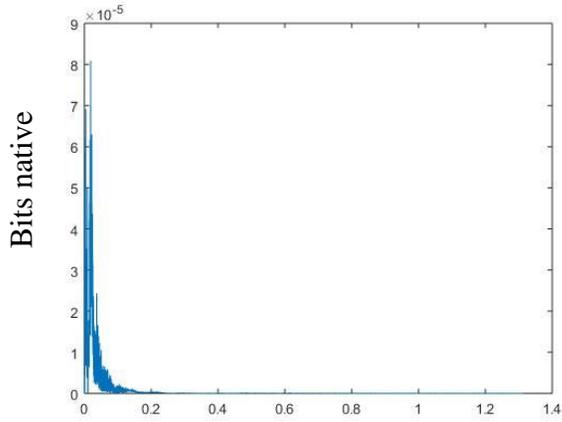
Noveno Armónico B3



Décimo Armónico B3

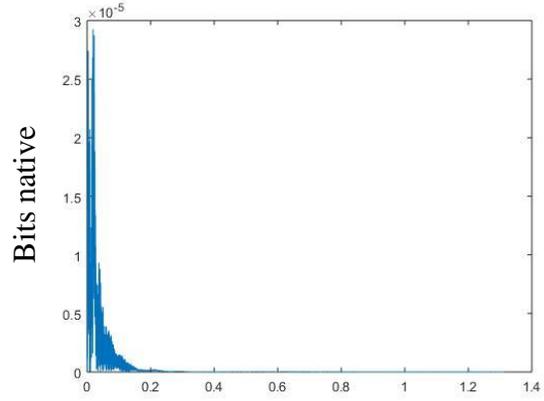


Fundamental B4



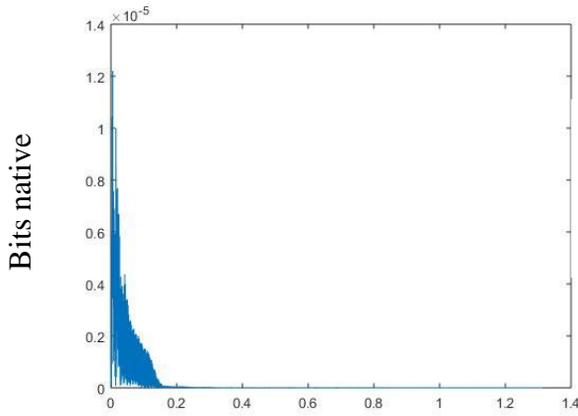
Segundos

Primer armónico B4



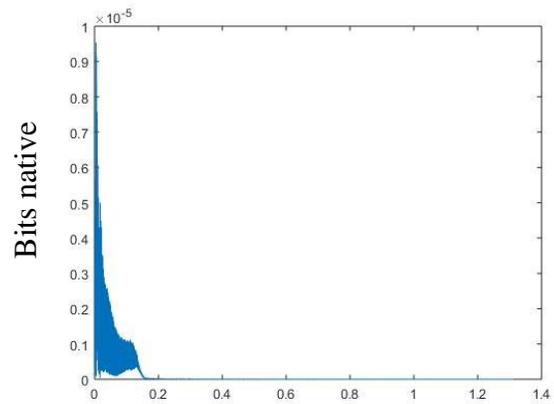
Segundos

Segundo armónico B4



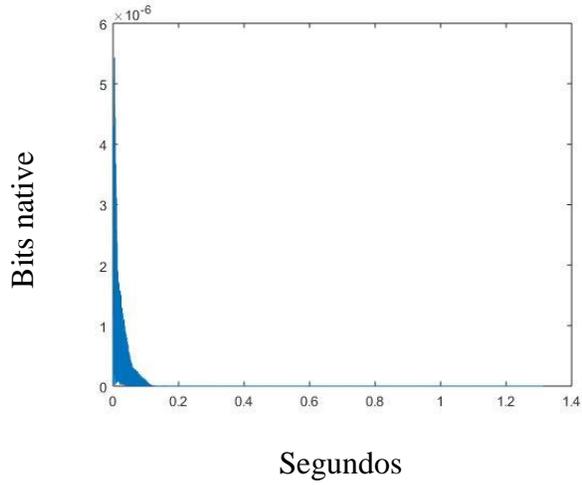
Segundos

Tercer Armónico B4

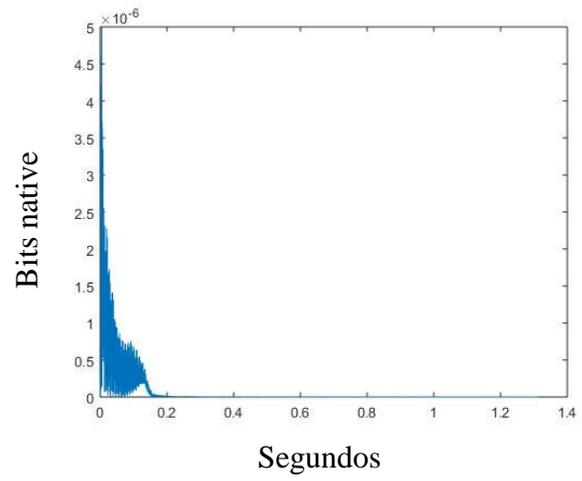


Segundos

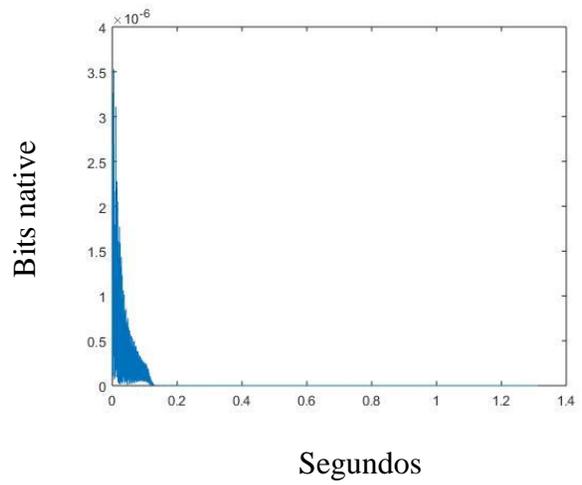
Cuarto Armónico B4



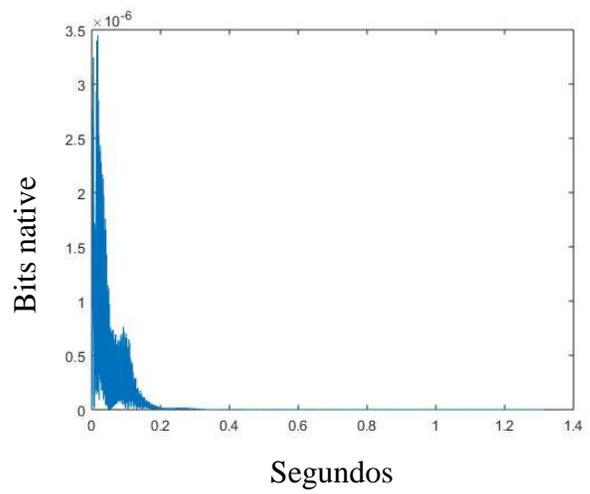
Quinto Armónico B4



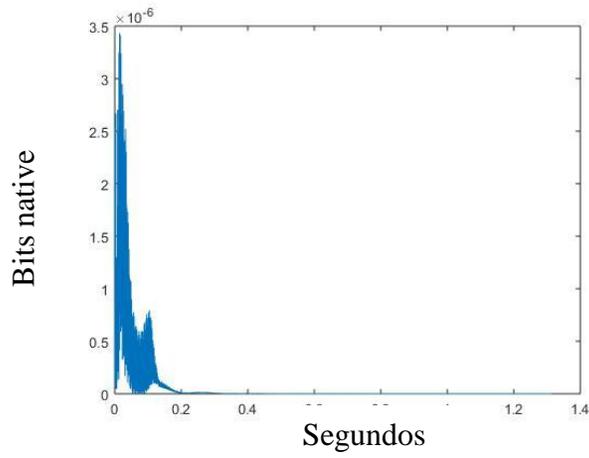
Sexto Armónico B4



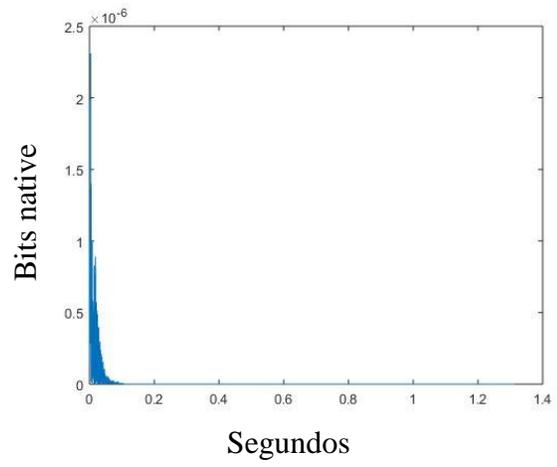
Séptimo Armónico B4



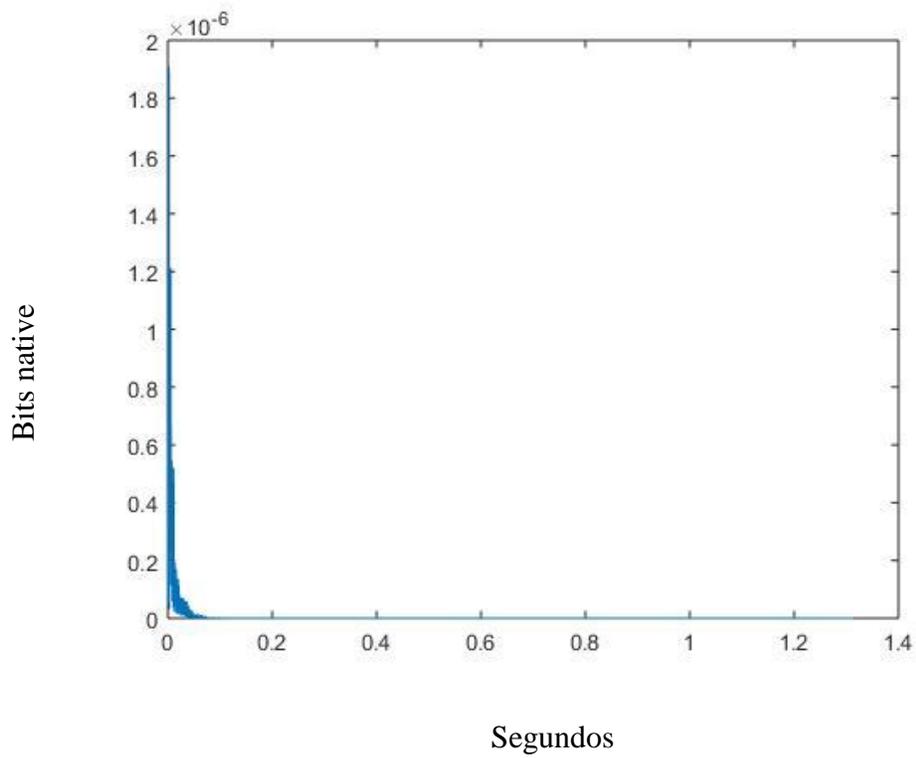
Octavo Armónico B4



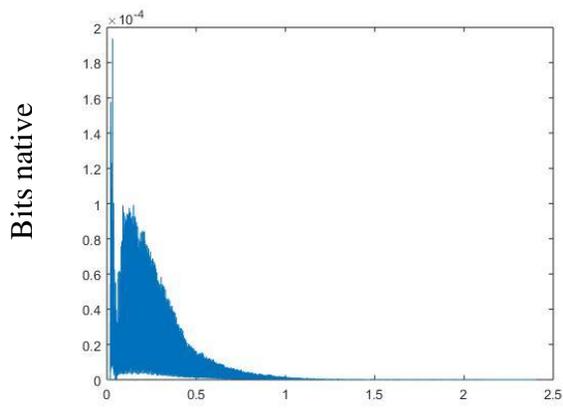
Noveno Armónico B4



Décimo Armónico B4

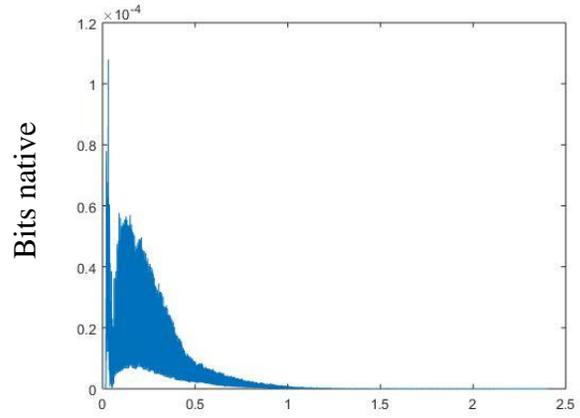


Fundamental D4



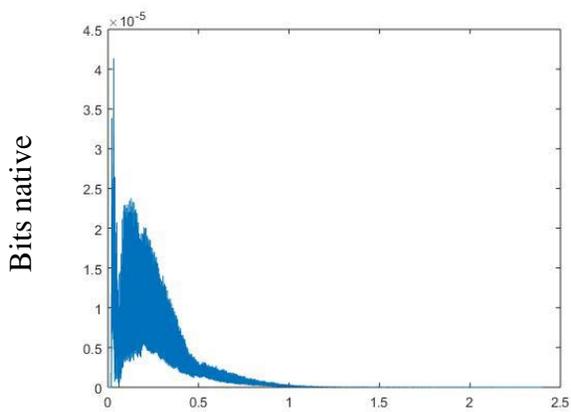
Segundos

Primer Armónico D4



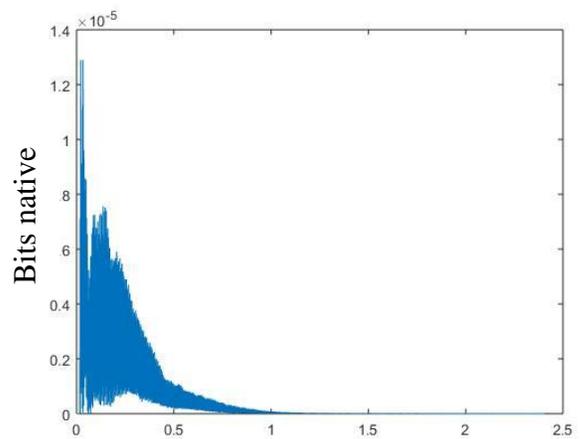
Segundos

Segundo Armónico D4



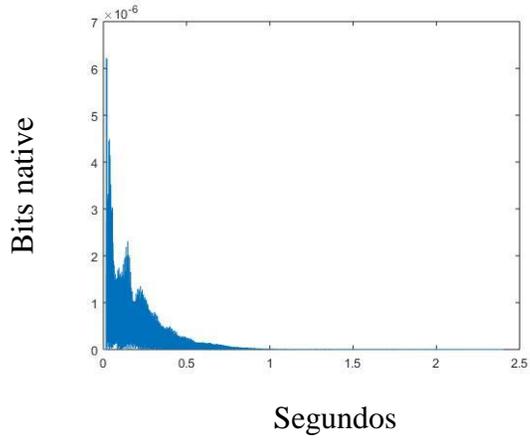
Segundos

Tercer Armónico D4

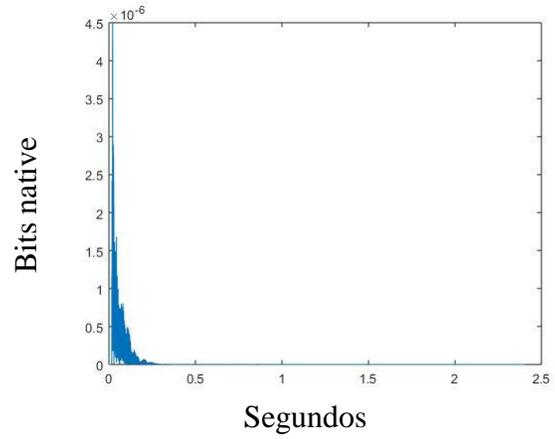


Segundos

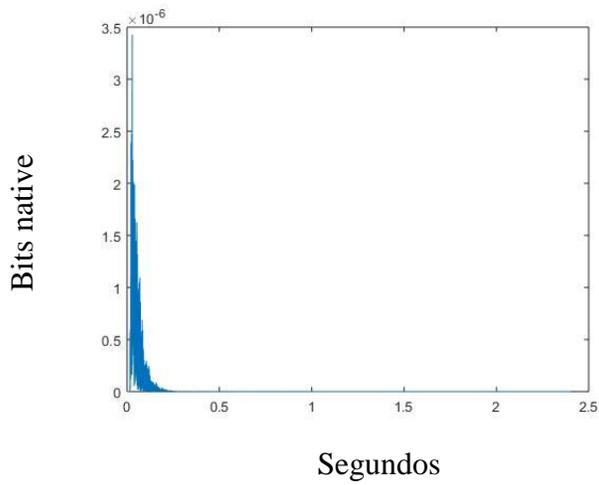
Cuarto Armónico D4



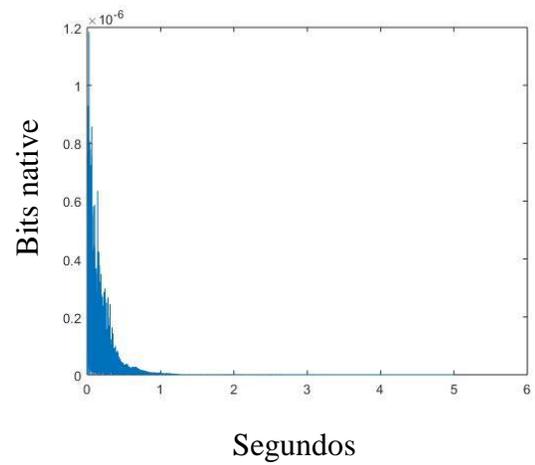
Quinto Armónico D4



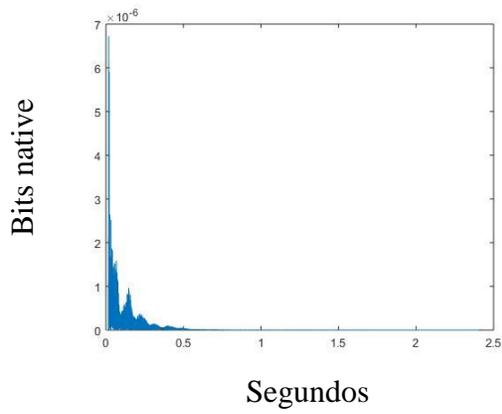
Sexto Armónico D4



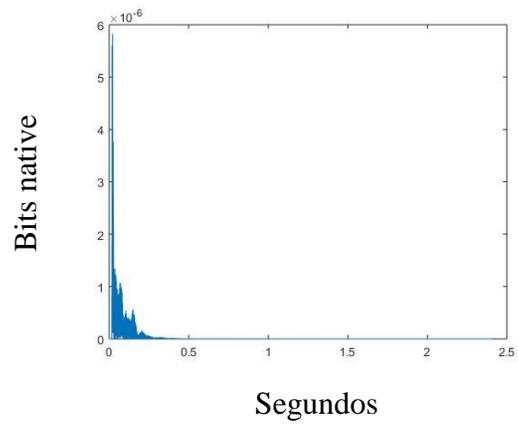
Séptimo Armónico D4



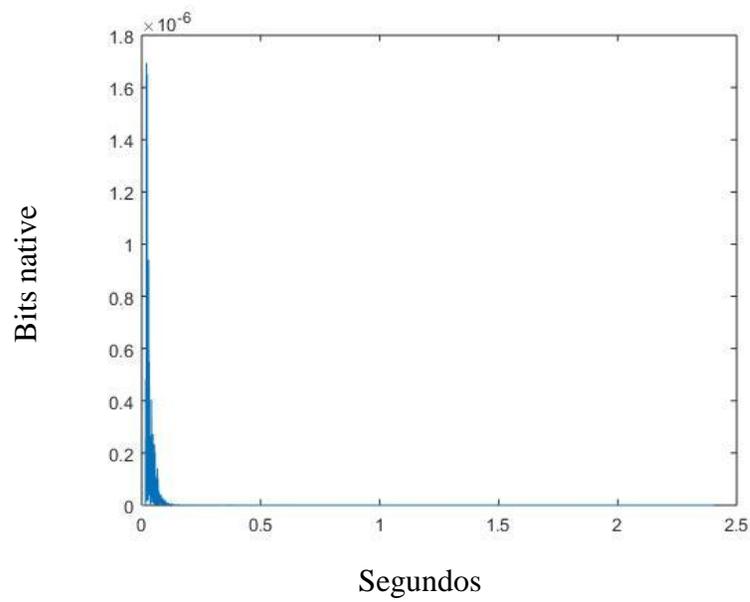
Octavo Armónico D4



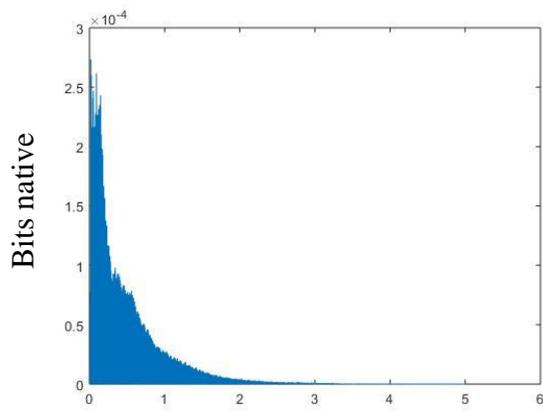
Noveno Armónico D4



Décimo Armónico D4

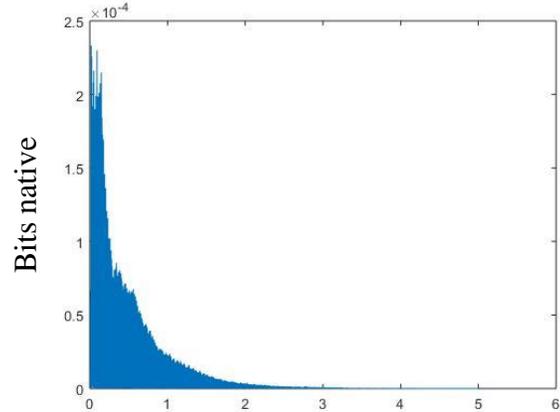


Fundamental D3



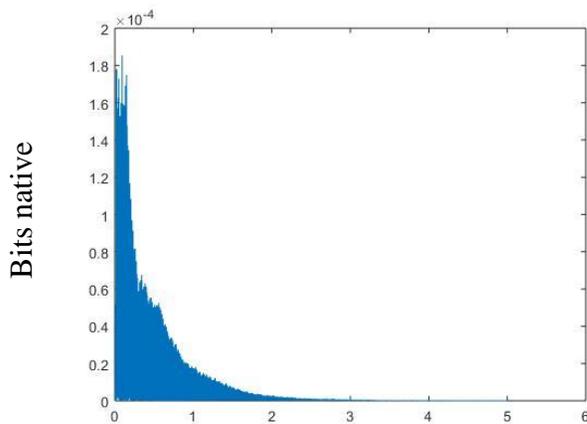
Segundos

Primer Armónico D3



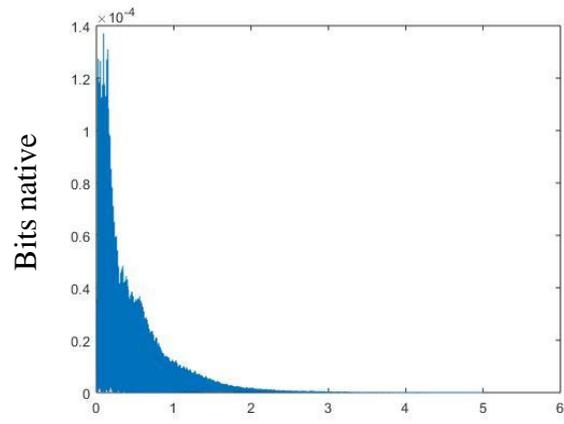
Segundos

Segundo Armónico D3



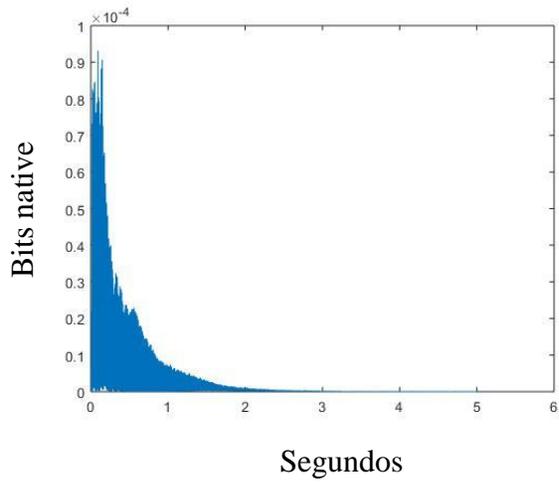
Segundos

Tercer Armónico D3

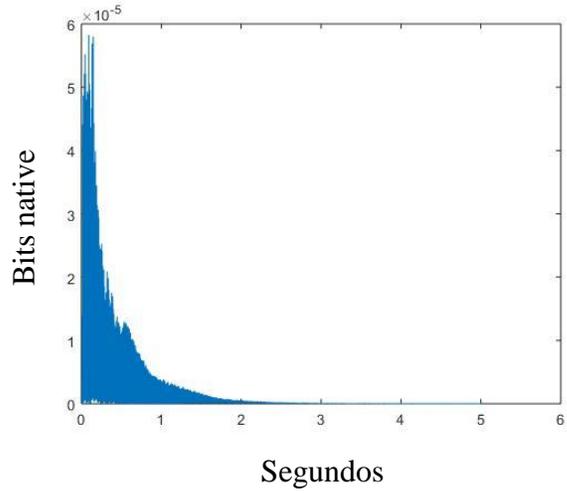


Segundos

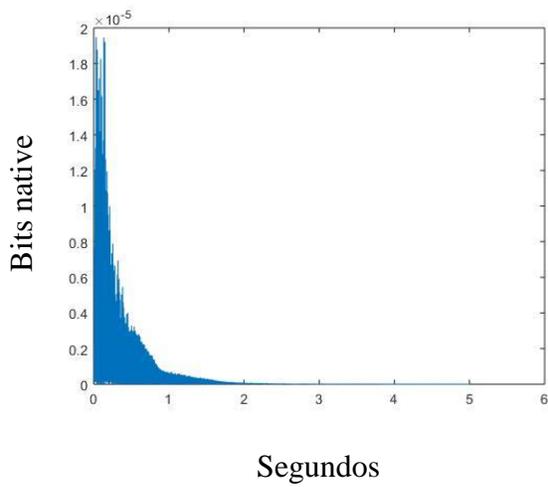
Cuarto Armónico D3



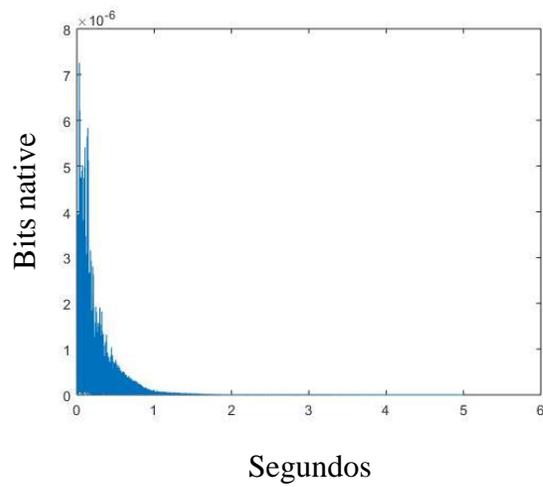
Quinto armónico D3



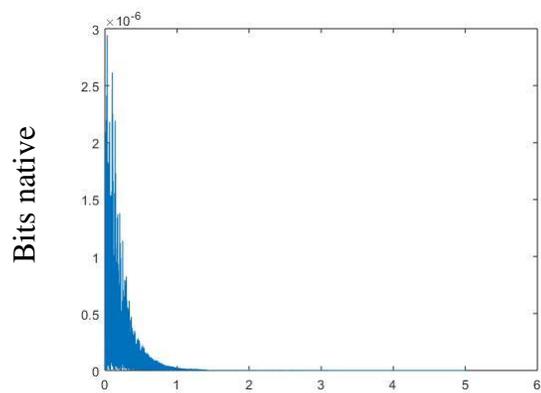
Sexto Armónico D3



Séptimo Armónico D3

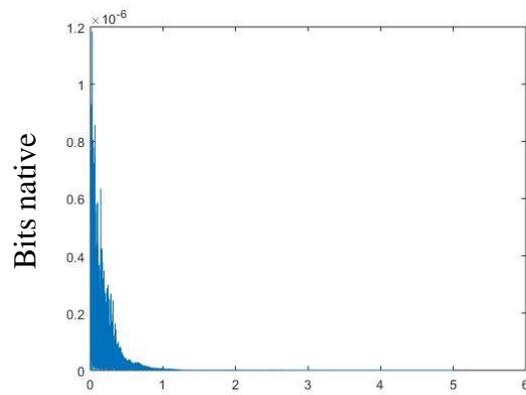


Octavo Armónico D3



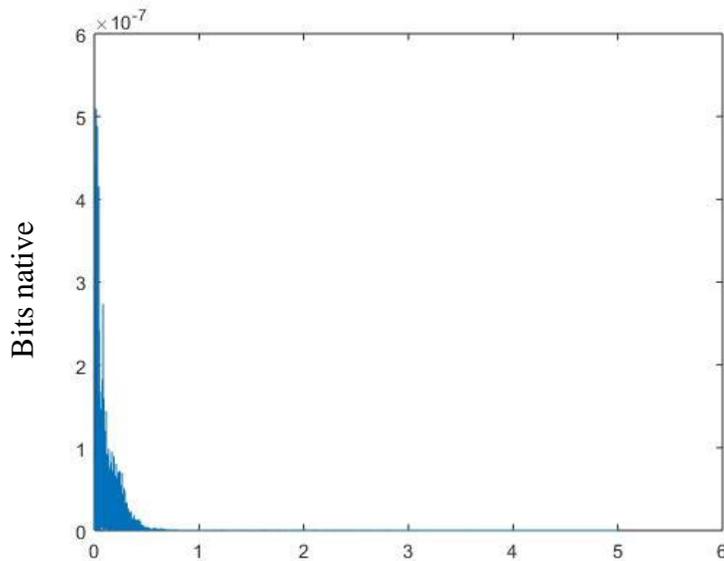
Segundos

Noveno Armónico D3



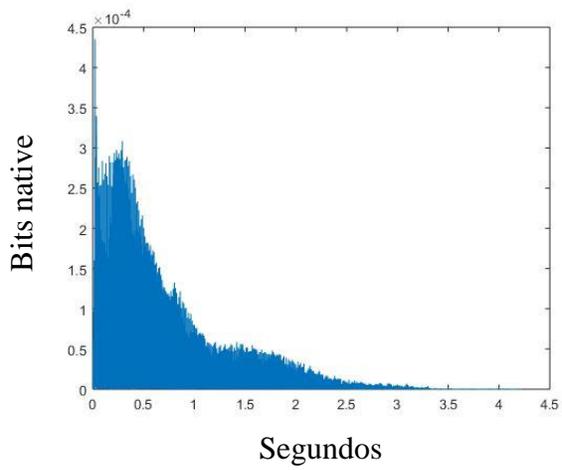
Segundos

Décimo Armónico D3

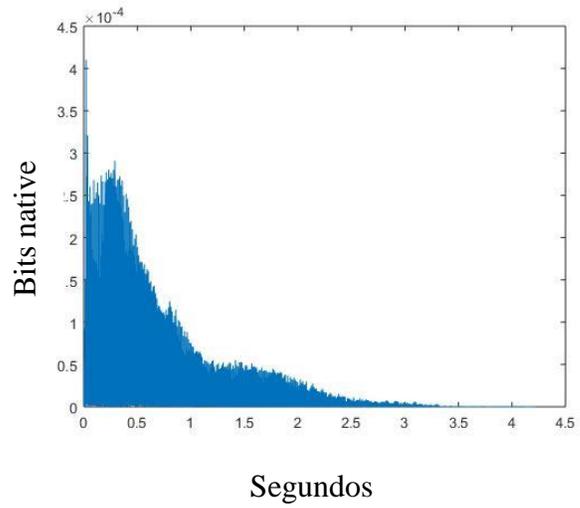


Segundos

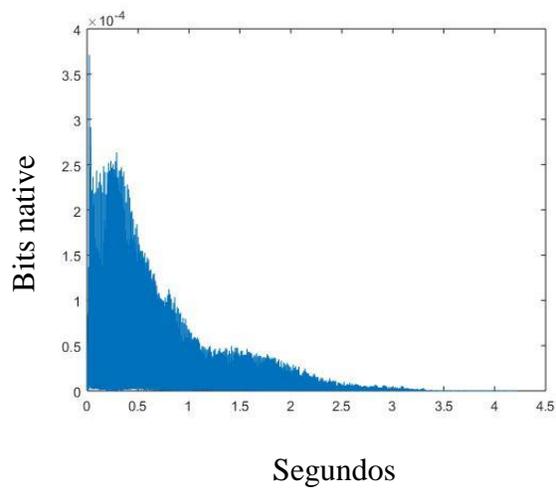
Fundamental F2



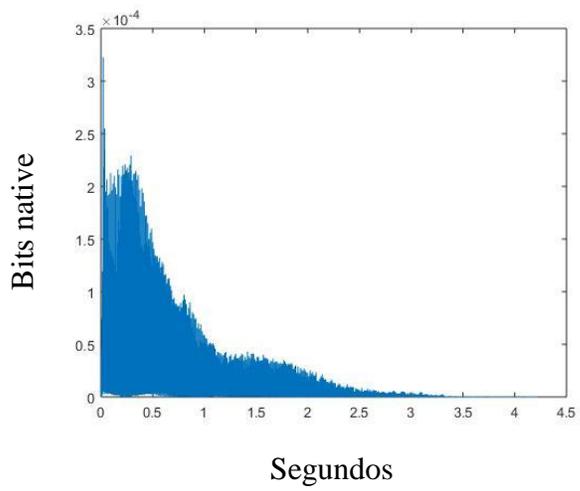
Primer Armónico F2



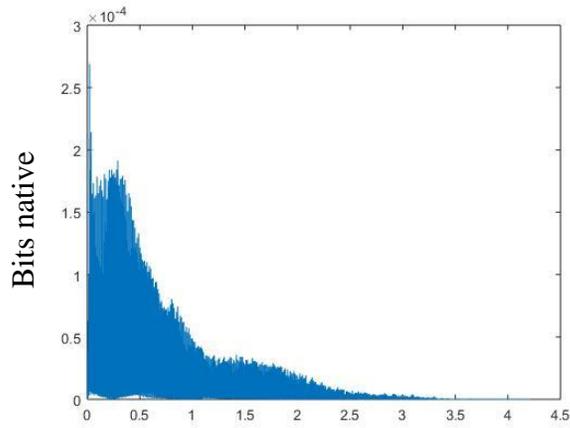
Segundo Armónico F2



Tercer Armónico F2

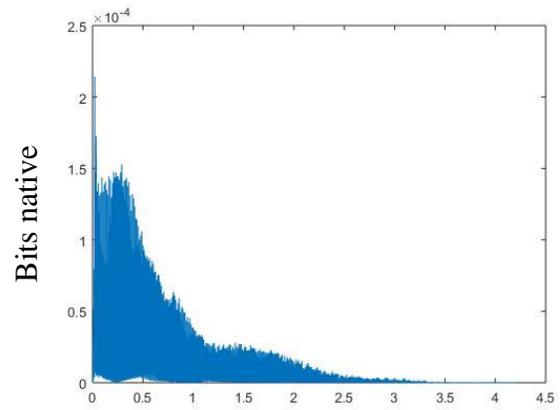


Cuarto Armónico F2



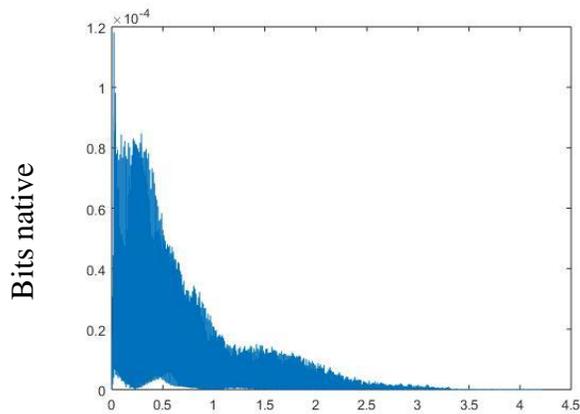
Segundos

Quinto Armónico F2



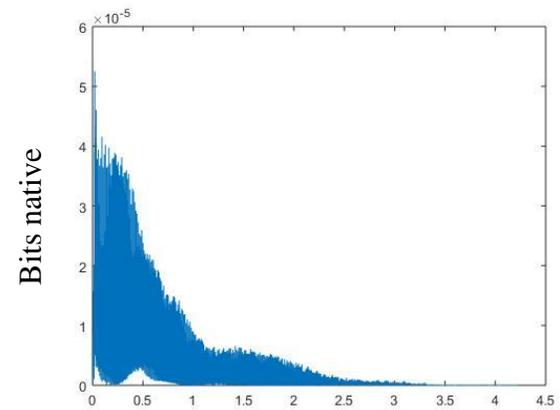
Segundos

Sexto Armónico F2



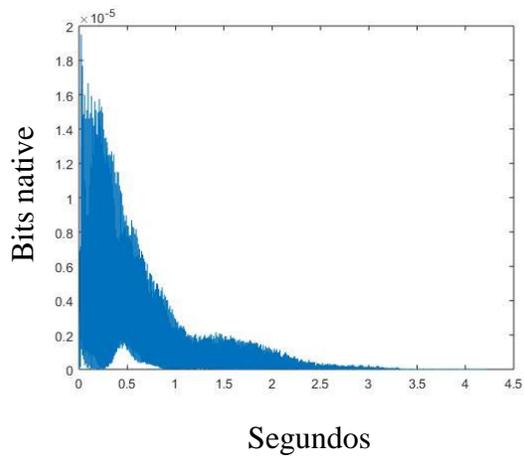
Segundos

Séptimo Armónico F2

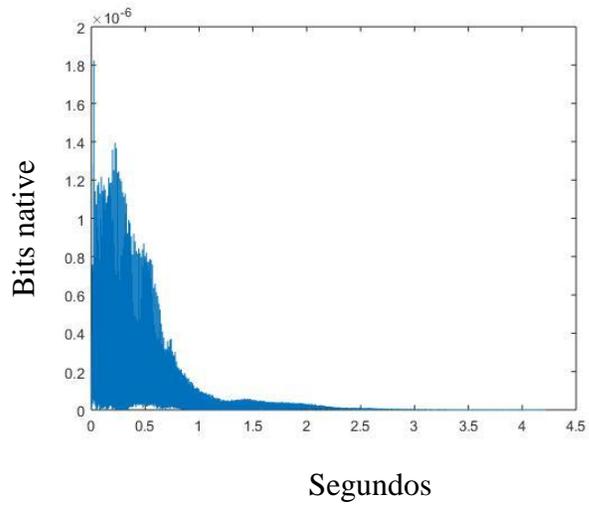


Segundos

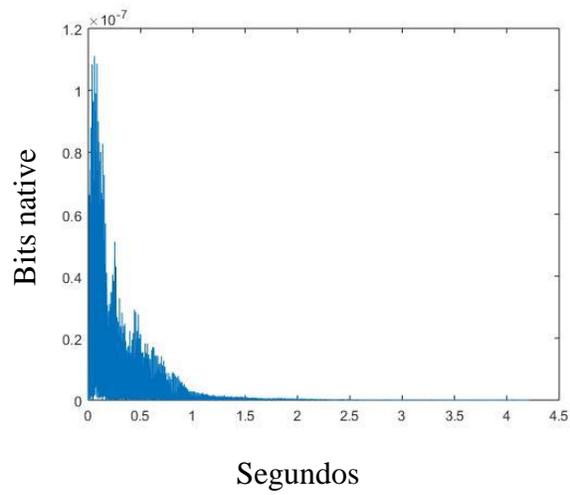
Octavo Armónico F2



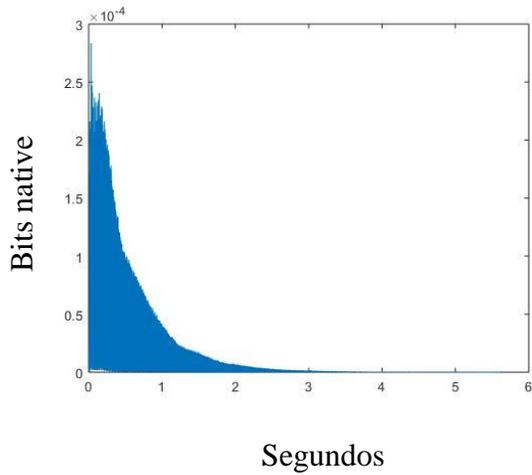
Noveno Armónico F2



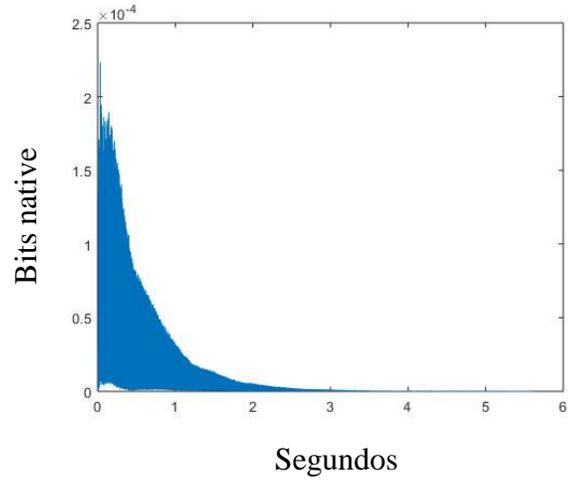
Décimo Armónico F2



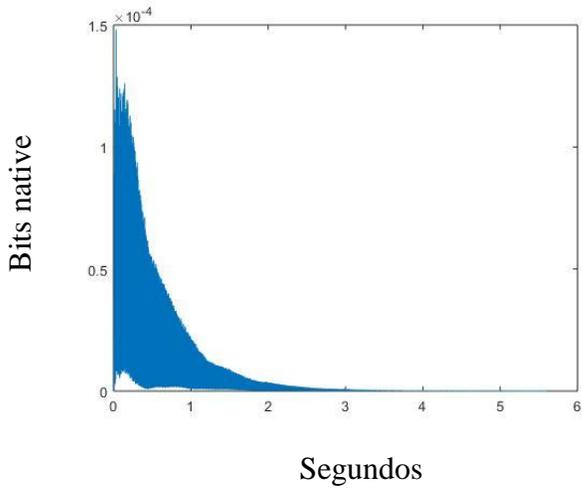
Fundamental F3



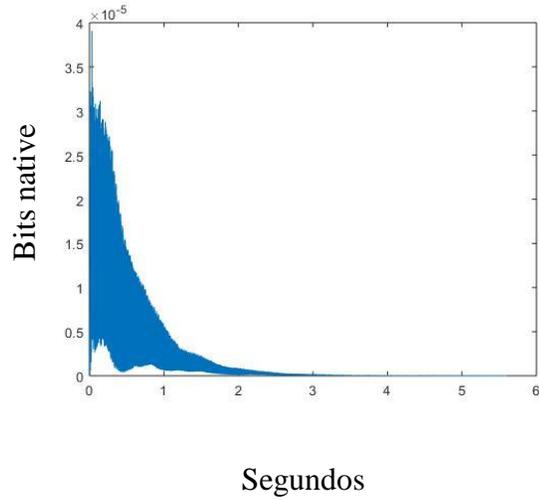
Primer Armónico F3



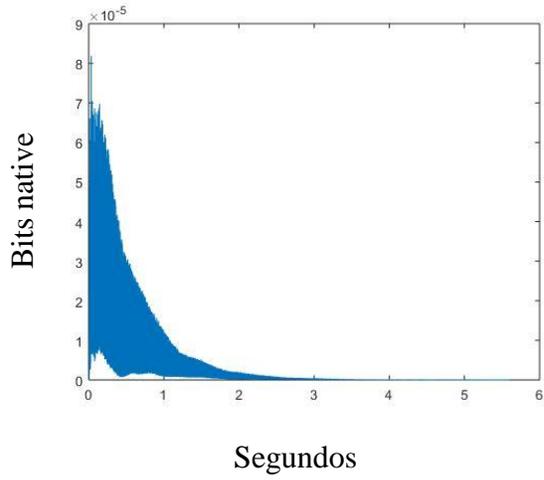
Segundo Armónico F3



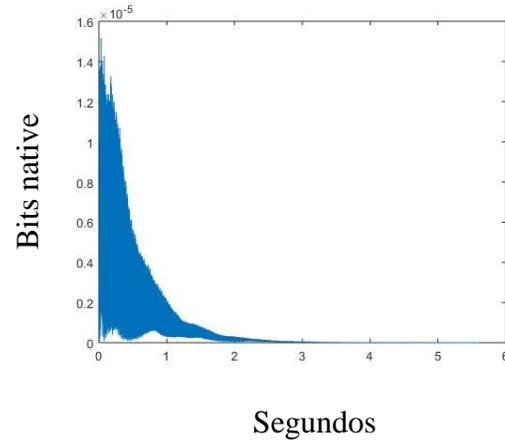
Tercer Armónico F3



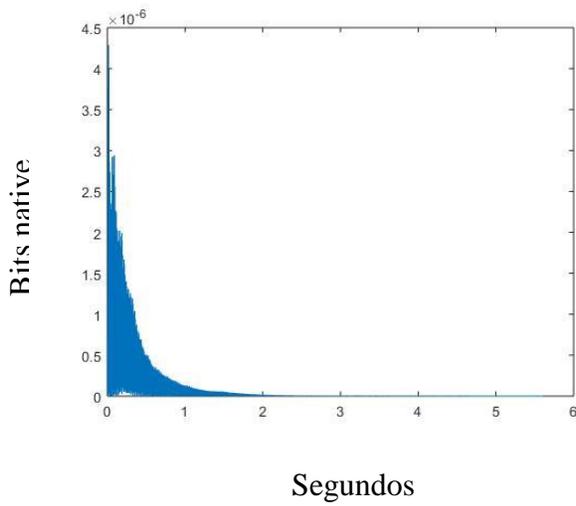
Cuarto Armónico F3



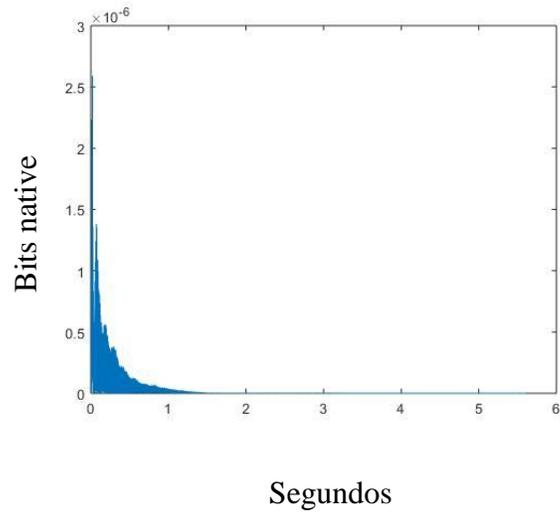
Quinto Armónico F3



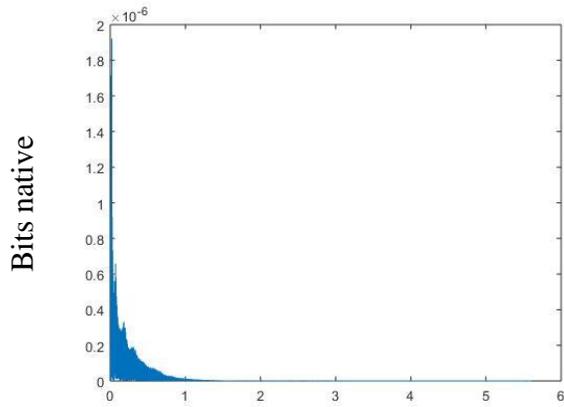
Sexto Armónico F3



Séptimo Armónico F3

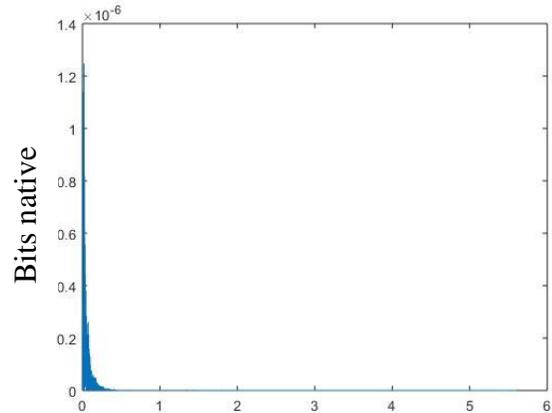


Octavo Armónico F3



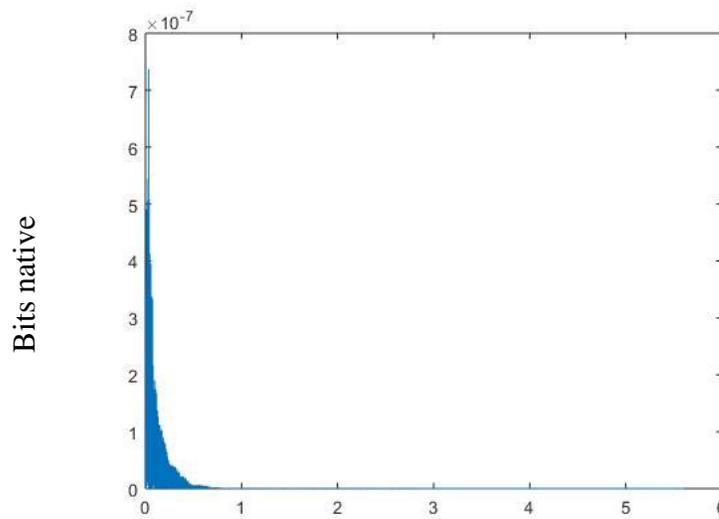
Segundos

Noveno Armónico F3



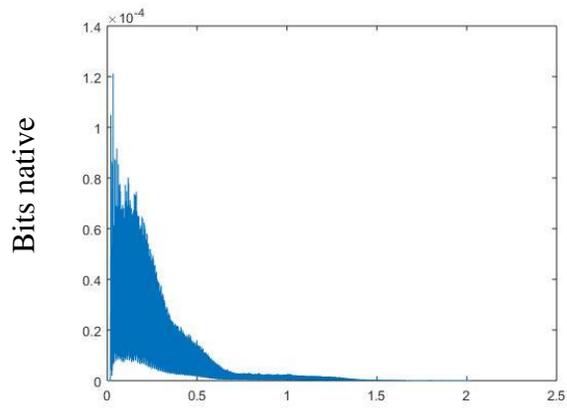
Segundos

Décimo Armónico F3



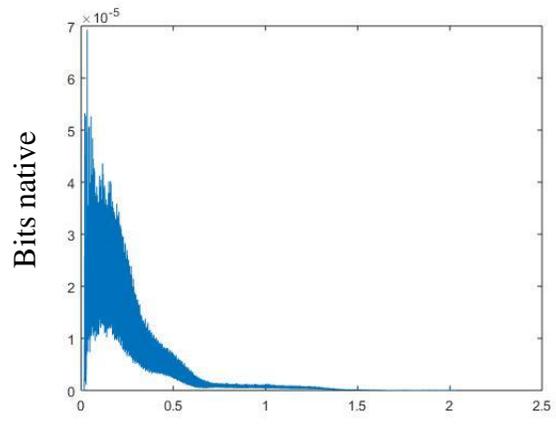
Segundos

Fundamental F4



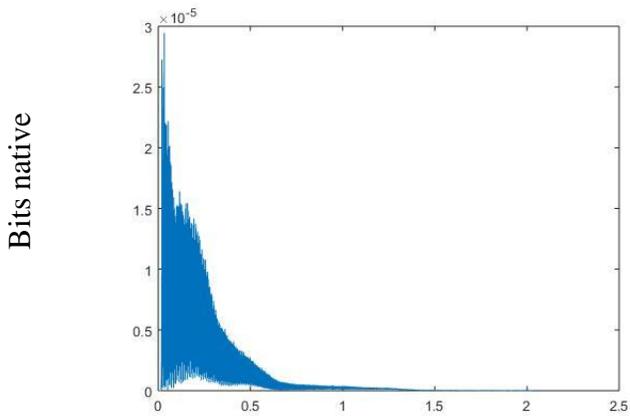
Segundos

Primer Armónico F4



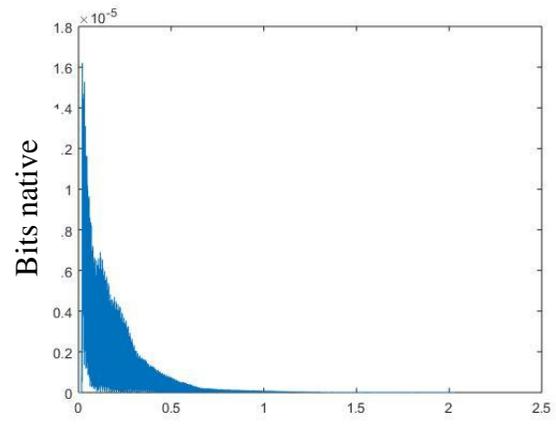
Segundos

Segundo Armónico F4



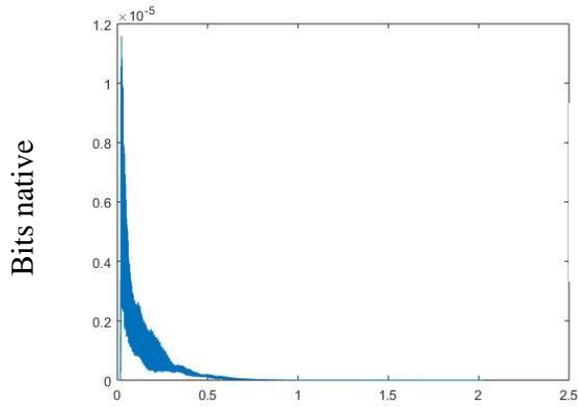
Segundos

Tercer Armónico F4



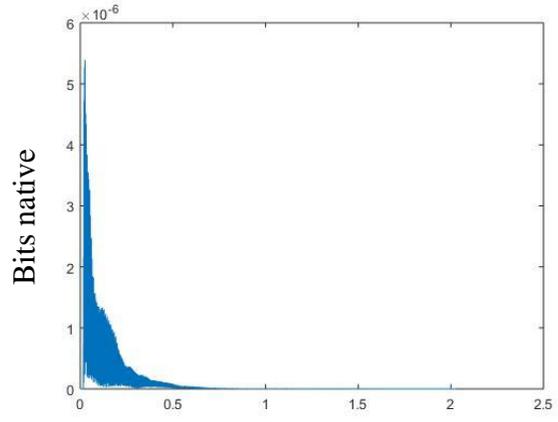
Segundos

Cuarto Armónico F4



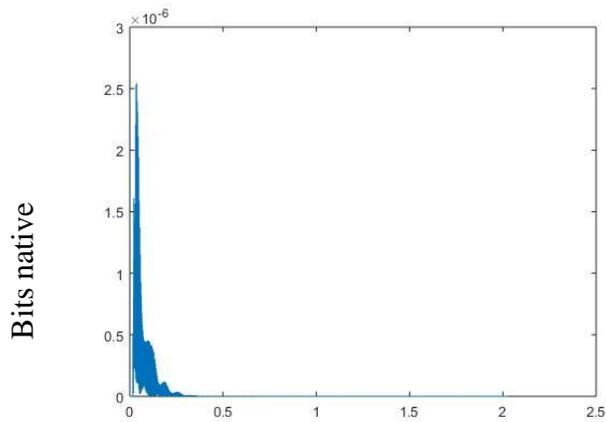
Segundos

Quinto Armónico F4



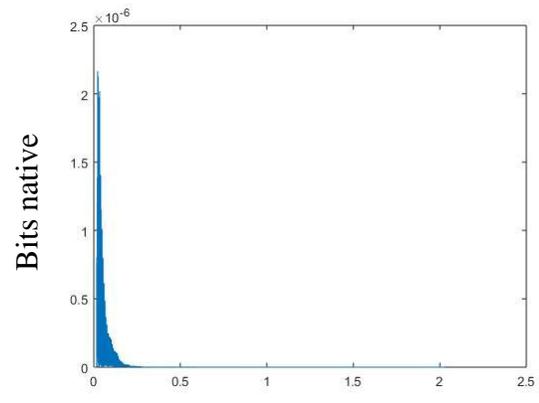
Segundos

Sexto Armónico F4



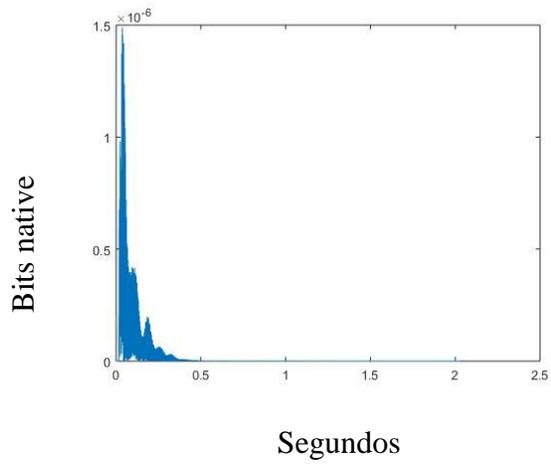
Segundos

Séptimo Armónico F4

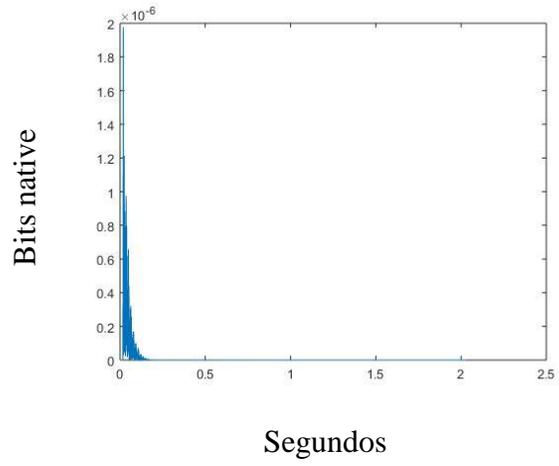


Segundos

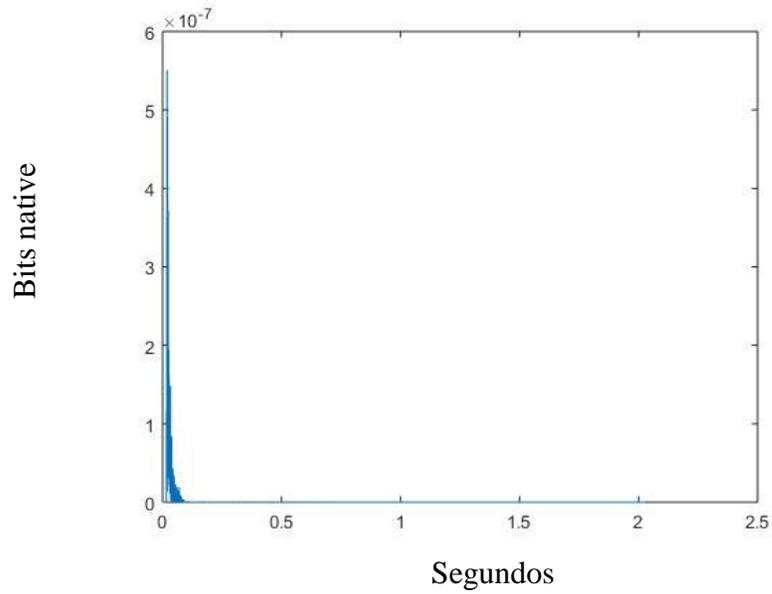
Octavo Armónico F4



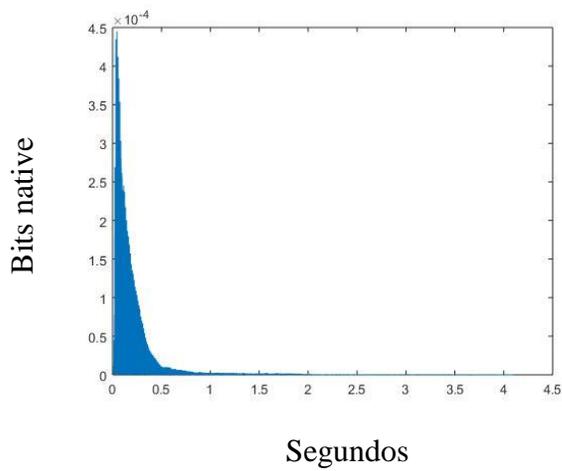
Noveno Armónico F4



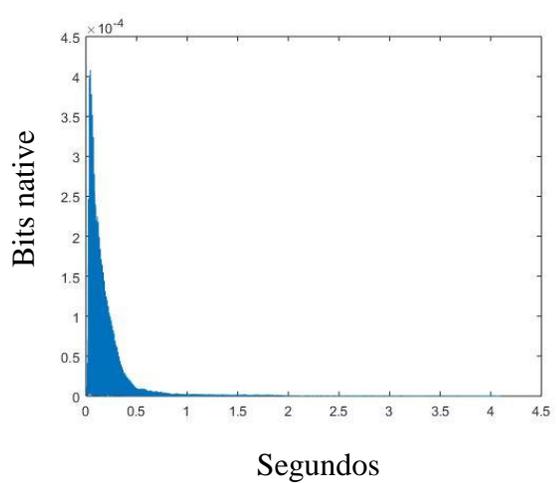
Décimo Armónico F4



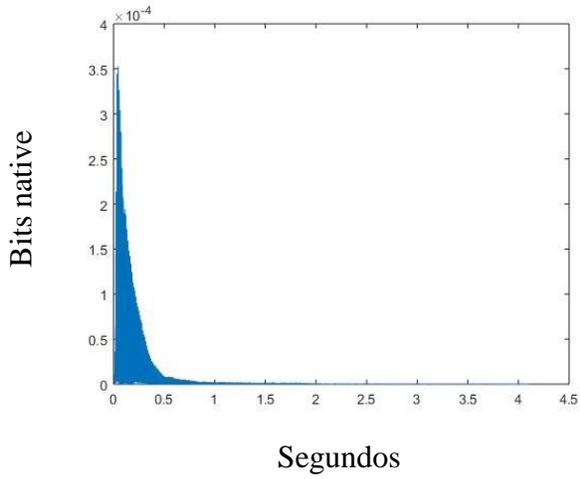
Fundamental G#2



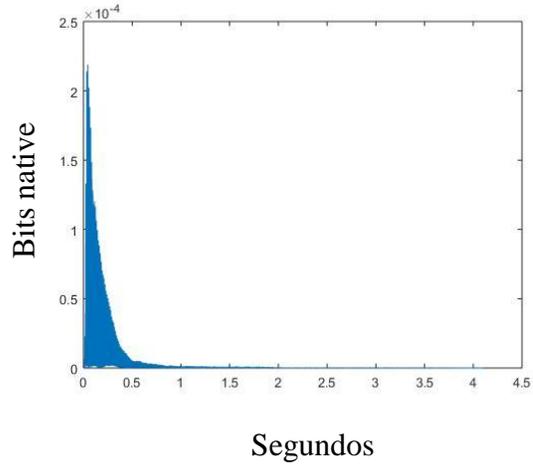
Primer Armónico G#2



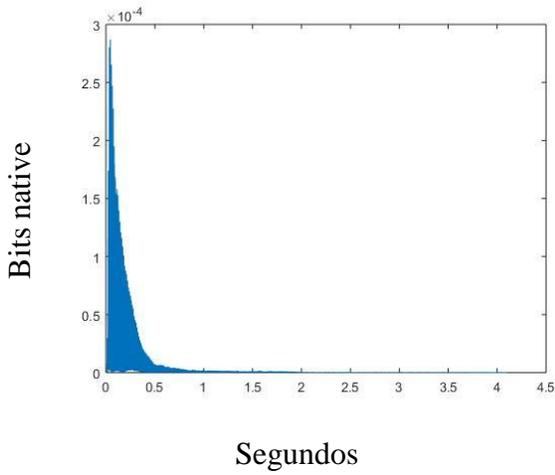
Segundo Armónico G#2



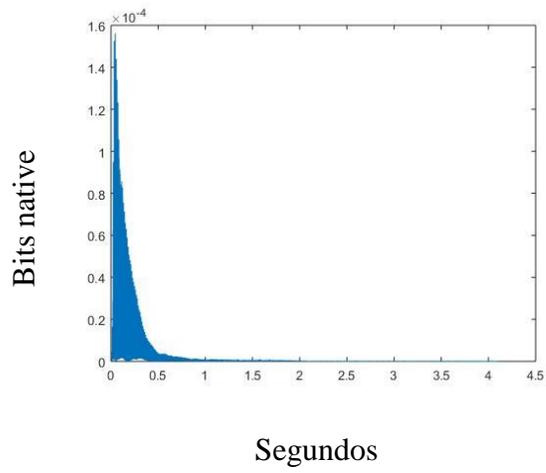
Tercer Armónico G#2



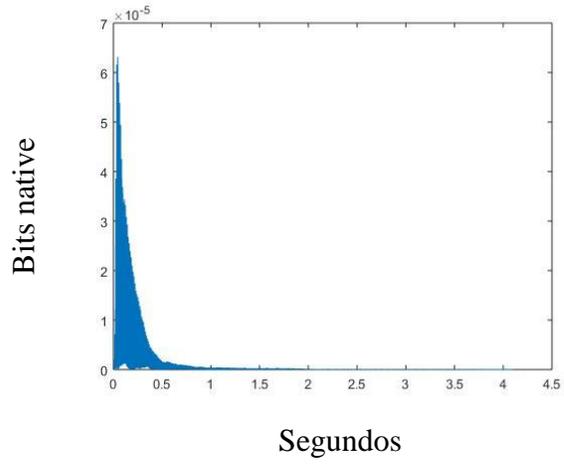
Cuarto Armónico G#2



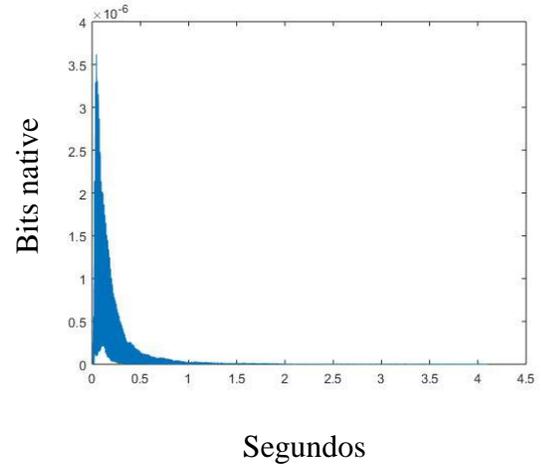
Quinto Armónico G#2



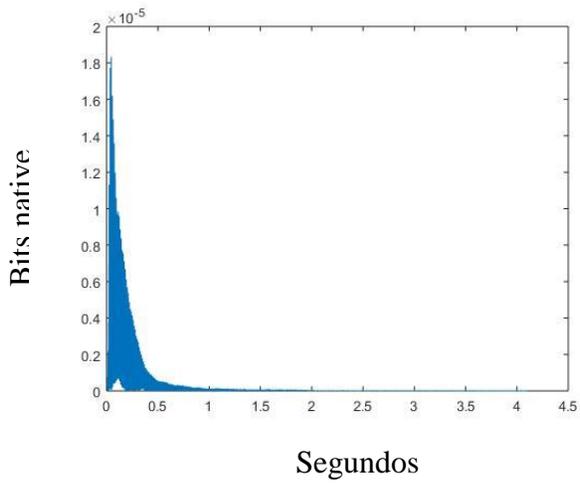
Sexto Armónico G#2



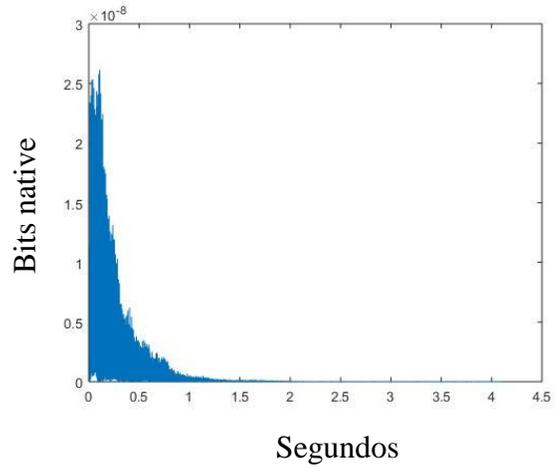
Séptimo Armónico G#2



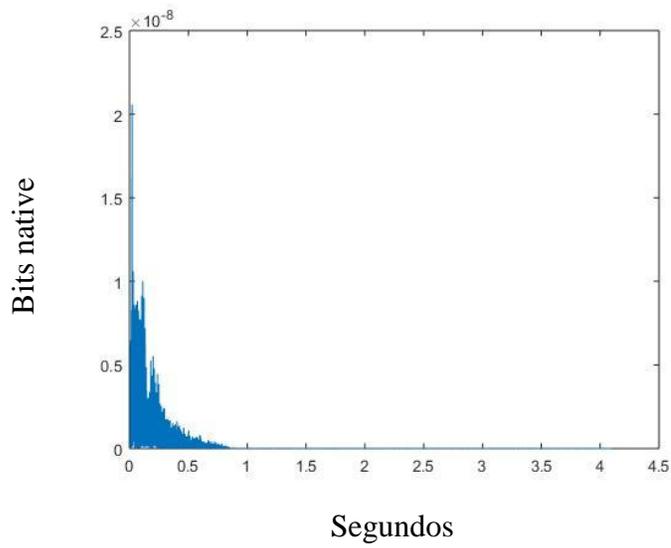
Octavo Armónico G#2



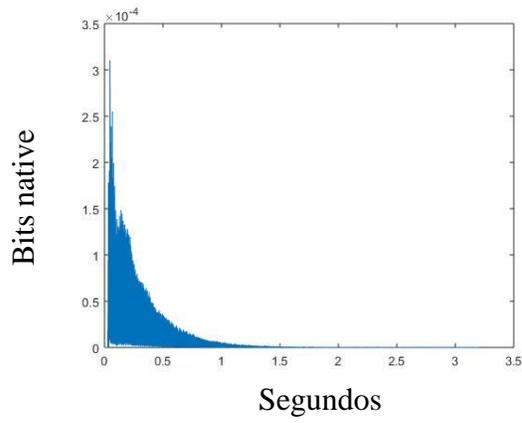
Noveno Armónico G#2



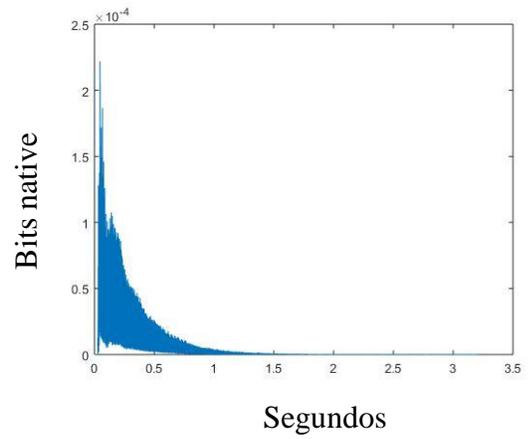
Décimo Armónico G#2



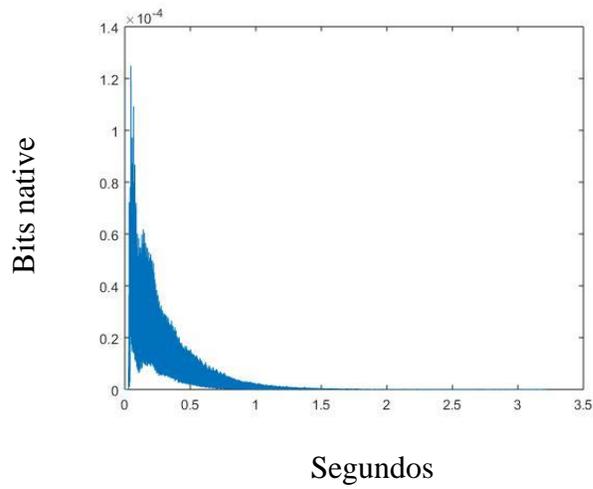
Fundamental G#3



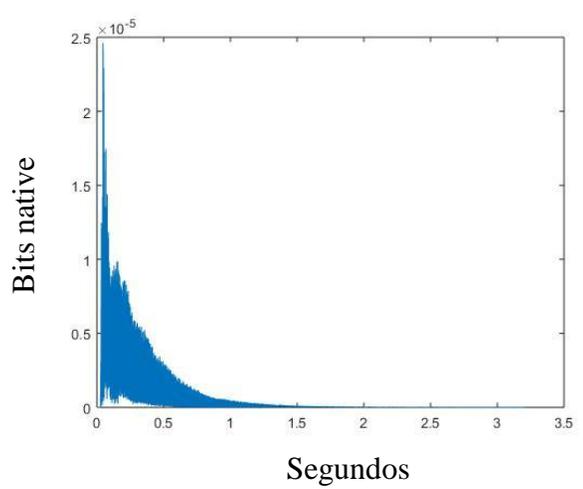
Primer Armónico G#3



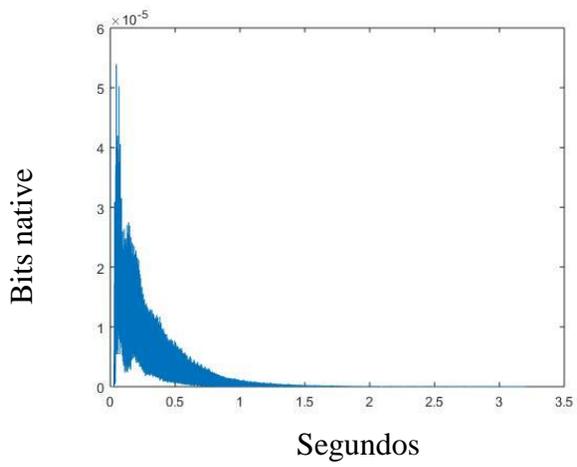
Segundo Armónico G#3



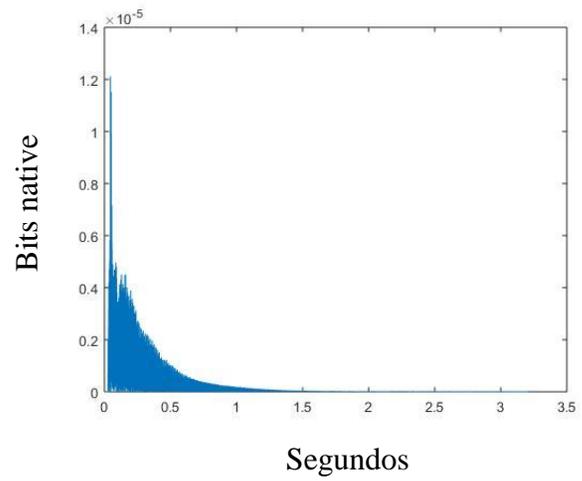
Tercer Armónico G#3



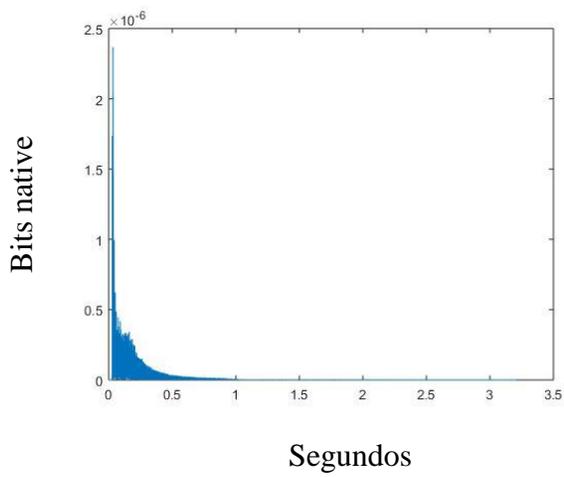
Cuarto Armónico G#3



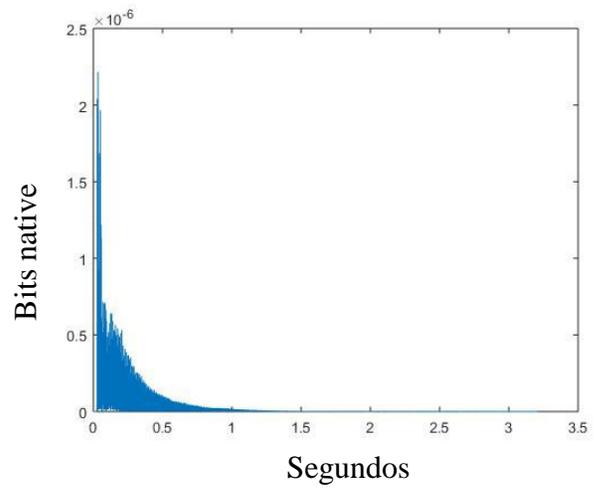
Quinto Armónico G#3



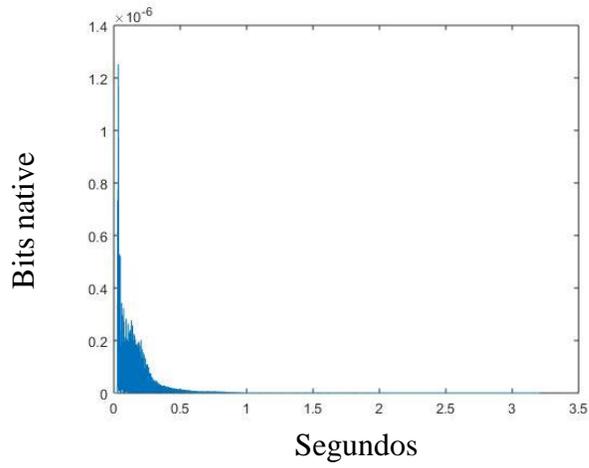
Sexto Armónico G#3



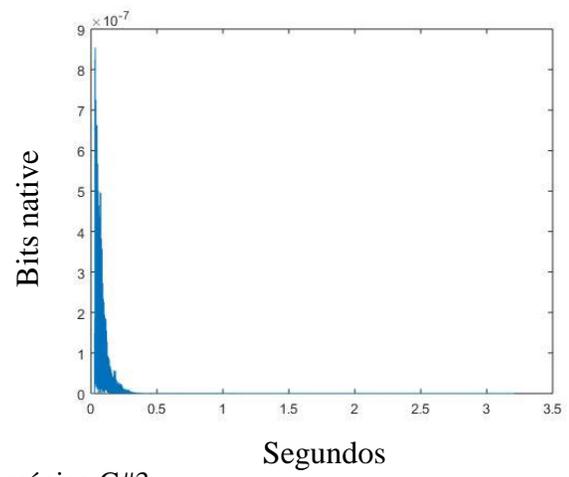
Séptimo Armónico G#3



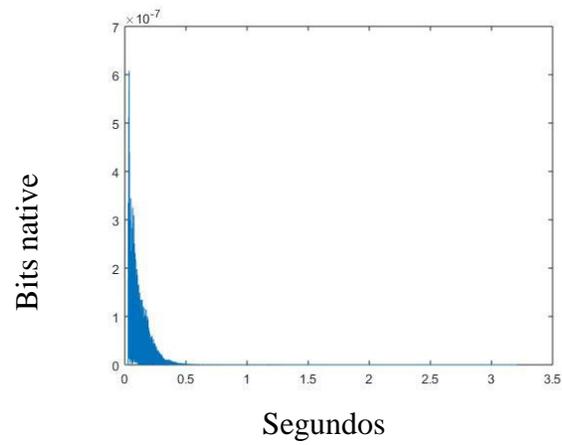
Octavo Armónico G#3



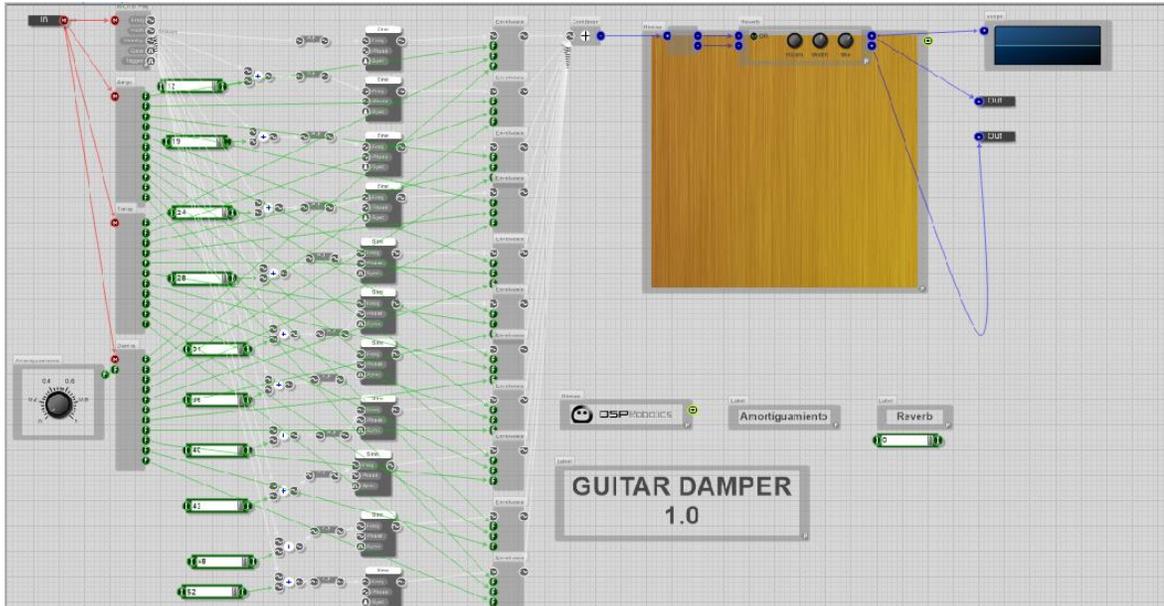
Noveno Armónico G#3



Décimo Armónico G#3



## D. ANEXO D: DIAGRAMA DEL SINTETIZADOR COMPLETO



## E. ANEXO E: Tabla de valores para cada armónico

### Unidades

Frecuencia: Hercios

$\gamma$ : Hercios<sup>-1</sup>

Decay time: Segundos

Amp Max: bits double

Amp Sint: Adimensional

Tabla de valores para la nota B2

Frecuencia	$\gamma$	Decay time	Amp Máxima	Amp Sint
123,47	-2,267	3,04855096	0,0001647601	0,16476015
246,94	-2,26	3,05714174	0,0001468937	0,14689374
370,41	-2,281	3,02904149	0,0001211169	0,12111687
493,88	-2,282	3,02781794	0,0000924941	0,09249412
617,35	-2,291	3,0160193	0,0000655871	0,06558711
740,82	-2,294	3,01264835	0,0000442353	0,04423527
987,76	-2,263	3,05342011	0,0000173678	0,01736782
1234,7	-2,244	3,07996721	0,0000052611	0,0052611
1481,64	-2,228	3,10198688	0,0000018537	0,00185371
1975,52	-1,955	3,53477917	0,0000008467	0,00084671
2469,4	-1,538	4,49161137	0,0000004095	0,00040952

Tabla de valores para la nota B3

Frecuencia	$\gamma$	Decay time	Amp Máxima	Amp Sint
246,93	-1,129	6,12132335	0,0001081343	0,10813426
493,86	-1,161	5,95259398	0,0000709897	0,07098974
740,79	-1,28	5,39820689	0,0000348897	0,0348897
987,72	-1,564	4,41821949	0,0000171428	0,01714275
1234,65	-1,894	3,6477004	0,0000108011	0,01080111
1481,58	-2,213	3,12187939	0,0000067662	0,00676618
1975,44	-2,21	3,127307	0,0000036953	0,00369527
2469,3	-1,84	3,75447152	0,0000016280	0,00162804
2963,16	-1,455	4,75010494	0,0000011233	0,00112333
3950,88	-1,113	6,21121445	0,0000012454	0,00124537
4938,6	-0,823	8,39352851	0,0000005051	0,00050514

Tabla de valores para la nota B4

Frecuencia	$\gamma$	Decay time	Amp Máxima	Amp Sint
493,88	-1,668	4,14159911	0,0000404048	0,04040485
987,76	-2,532	2,72906356	0,0000146282	0,01462823
1481,64	-3,691	1,87208948	0,0000061014	0,00610142
1975,52	-3,464	1,99452669	0,0000047709	0,0047709
2469,4	-3,518	1,96398611	0,0000024980	0,00249804
2963,28	-3,208	2,1542847	0,0000017247	0,00172471
3951,04	-3,102	2,22794068	0,0000017164	0,00171638
4938,8	-2,473	2,79407729	0,0000017638	0,00176385
5926,56	-1,415	16,6493043	0,0000027150	0,00271496
7902,08	-1,114	6,20332214	0,0000011550	0,00115503
9877,6	-0,451	15,3250033	0,0000009547	0,00095472

Tabla de valores para la nota D3

Frecuencia	$\gamma$	Decay time	Amp Máxima	Amp Sint
146,932	-1,539	4,48919583	0,0001363986	0,13639855
293,864	-1,56	4,42952428	0,0001165417	0,11654169
440,796	-1,588	4,35038856	0,0000911710	0,09117102
587,728	-1,612	4,28659132	0,0000672352	0,06723516
734,66	-1,608	4,2983721	0,0000455428	0,04554282
881,592	-1,609	4,2948515	0,0000291491	0,02914908
1175,456	-1,632	4,23432512	0,0000101171	0,01011706
1469,32	-1,659	4,16639378	0,0000034908	0,00349085
1763,184	-1,52	4,54643029	0,0000014761	0,00147614
2350,912	-1,229	5,62305302	0,0000005529	0,00055288
2938,64	-0,766	9,02664418	0,0000002709	0,00027092

Tabla de valores para la nota D4

Frecuencia	$\gamma$	Decay time	Amp Máxima	Amp Sint
293,665	-4,731	1,46066505	0,0001001075	0,10010748
587,33	-4,796	1,44087734	0,0000557215	0,05572149
880,995	-4,855	1,42322801	0,0000200632	0,02006317
1174,66	-4,86	1,4218243	0,0000059298	0,00592979
1468,325	-4,709	1,46752134	0,0000033601	0,00336005
1761,99	-4,645	1,48753125	0,0000031131	0,00311306
2349,32	-4,029	1,7148912	0,0000032227	0,00322268
2936,65	-3,405	2,02944078	0,0000023732	0,0023732
3523,98	-2,828	2,44346629	0,0000016366	0,00163658
4698,64	-1,529	4,5184525	0,0000008766	0,00087659
5873,3	-1,448	4,77168563	0,0000003585	0,00035852

Tabla de valores para la nota F2

Frecuencia	$\gamma$	Decay time	Amp Máxima	Amp Sint
87,3	-1,718	4,02193042	0,0002176091	0,21760914
174,6	-1,723	4,01136165	0,0002050819	0,20508192
261,9	-1,722	4,01243274	0,0001856800	0,18568004
349,2	-1,721	4,0146585	0,0001613651	0,1613651
436,5	-1,724	4,00858695	0,0001344314	0,13443144
523,8	-1,728	3,99772942	0,0001071694	0,10716942
698,4	-1,753	3,94191453	0,0000590800	0,05907998
873	-1,762	3,92146581	0,0000262565	0,0262565
1047,6	-1,809	3,81875281	0,0000097550	0,009755
1396,8	-2,265	3,05106344	0,0000009125	0,00091245
1746	-2,014	3,43170049	0,0000000555	5,5546E-05

Tabla de valores para la nota F3

Frecuencia	$\gamma$	Decay time	Amp Máxima	Amp Sint
174,61	-2,67	2,58758199	0,0001547532	0,15475319
349,22	-2,649	2,6090135	0,0001248509	0,12485086
523,83	-2,614	2,64338876	0,0000870820	0,08708203
698,44	-2,552	2,70727799	0,0000523903	0,05239028
873,05	-2,521	2,74063974	0,0000272037	0,0272037
1047,66	-2,508	2,75559813	0,0000124082	0,01240817
1396,88	-2,49	2,77480376	0,0000026558	0,00265579
1746,1	-2,249	3,07207148	0,0000013786	0,00137861
2095,32	-2,235	3,0916101	0,0000011281	0,00112806
2793,76	-1,649	4,19163006	0,0000004178	0,0004178
3492,2	-1,22	5,66574767	0,0000000760	7,5978E-05

Tabla de valores para la nota F4

Frecuencia	$\gamma$	Decay time	Amp Máxima	Amp Sint
349,23	-3,276	2,1094964	0,0000606579	0,06065789
698,46	-3,278	2,1081357	0,0000346410	0,03464099
1047,69	-3,513	1,96682439	0,0000147261	0,01472614
1396,92	-3,964	1,74335185	0,0000080998	0,00809977
1746,15	-4,98	1,3875089	0,0000057934	0,00579344
2095,38	-5,006	1,38026536	0,0000026917	0,0026917
2793,84	-4,042	1,70951816	0,0000007443	0,00074425
3492,3	-3,16	2,18693715	0,0000012714	0,00127141
4190,76	-2,924	2,3631471	0,0000010828	0,00108278
5587,68	-1,971	3,50648877	0,0000009881	0,00098811
6984,6	-1,594	4,33449118	0,0000002753	0,00027534

Tabla de valores para la nota G#2

Frecuencia	$\gamma$	Decay time	Amp Máxima	Amp Sint
103,826	-1,585	4,35901144	0,0002224254	0,22242536
207,652	-1,58	4,37359594	0,0002039853	0,20398534
311,478	-1,572	4,39688371	0,0001763660	0,17636598
415,304	-1,556	4,44133907	0,0001434760	0,143476
519,13	-1,554	4,44586325	0,0001094995	0,10949946
622,956	-1,558	4,43609422	0,0000780728	0,07807276
830,608	-1,581	4,37082247	0,0000315495	0,03154948
1038,26	-1,544	4,47658345	0,0000091662	0,00916618
1245,912	-1,421	4,86321981	0,0000018099	0,00180987
1661,216	-0,811	8,52465239	0,0000000131	0,00001307
2076,52	-0,562	12,3001161	0,0000000103	0,00001032

Tabla de valores para la nota G#3

Frecuencia	$\gamma$	Decay time	Amp Máxima	Amp Sint
207,562	-2,216	3,11808081	0,0001499874	0,14998744
415,124	-2,101	3,28914059	0,0001087562	0,10875622
622,686	-2,096	3,29679968	0,0000625604	0,06256041
830,248	-2,007	3,44336201	0,0000276717	0,02767167
1037,81	-1,988	3,47660563	0,0000128372	0,01283724
1245,372	-2,139	3,23067108	0,0000057246	0,00572465
1660,496	-2,026	3,40994818	0,0000011258	0,00112575
2075,62	-2,043	3,38170883	0,0000012580	0,00125795
2490,744	-1,834	3,76739888	0,0000006497	0,00064969
3320,992	-1,061	6,5133013	0,0000002813	0,0002813
4151,24	-0,823	8,39194634	0,0000004675	0,00046752

Tabla de valores para la nota G#4

Frecuencia	$\gamma$	Decay time	Amp Máxima	Amp Sint
415,305	-4,333	1,59475938	0,0000976176	0,09761763
830,61	-4,28	1,61438107	0,0000430105	0,04301055
1245,915	-4,632	1,4916784	0,0000156240	0,01562397
1661,22	-5,649	1,22332502	0,0000034793	0,00347933
2076,525	-6,771	1,02047879	0,0000009671	0,00096713
2491,83	-6,541	1,05646267	0,0000003733	0,00037327
3322,44	-5,423	1,27426629	0,0000005719	0,0005719
4153,05	-5,686	1,21532127	0,0000009577	0,00095766
4983,66	-5,059	1,36574788	0,0000005760	0,000576
6644,88	-3,015	2,29171204	0,0000004442	0,00044424
8306,1	-2,849	2,42517006	0,0000001368	0,00013676