

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA POLITÈCNICA SUPERIOR DE
GANDIA

Grado en Ing. Sist. de Telecom., Sonido e
Imagen



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA POLITÈCNICA
SUPERIOR DE GANDIA

**“Empleo de técnicas de análisis
tiempo-frecuencia para el modelado de
instrumentos musicales y su aplicación
a la síntesis musical aditiva.”**

TRABAJO FINAL DE GRADO

Autor/a:

Yetsibel Gonçalves Molina

Tutor/a:

Miguel Ferrer Contreras

GANDIA, 2020

Resumen

En este TFG se propone crear una base de datos de modelos de instrumentos musicales con el fin de sintetizar sus sonidos de forma sencilla. Tanto el trabajo de modelado como el de síntesis se realizará con la ayuda de MATLAB.

Habitualmente, la síntesis de instrumentos musicales, parte de un modelo armónico de los mismos, o en un caso más genérico, de un modelo de componentes tonales arbitrarias que se denominan parciales. Mediante técnicas de análisis espectral, se pretende caracterizar los armónicos de diferentes instrumentos, y así poder sintetizarlos mediante un modelo de síntesis aditiva. Estos modelos, no son siempre realistas, ya que pierden la información de la envolvente temporal de los sonidos emitidos por cada instrumento. Por lo tanto, para mejorar el modelado de los instrumentos, también se realizará un análisis temporal de los sonidos que emiten los instrumentos musicales con el objetivo de caracterizar la envolvente temporal de los mismos.

Finalmente, se propondrá la implementación de un sintetizador de instrumentos musicales desarrollado, también, en MATLAB, con el fin de generar sonidos sintetizados con un tono, amplitud, duración y modelo de instrumento elegidos por el usuario, que podría transcribir partituras para sintetizar cualquier composición musical.

Palabras Clave

Síntesis Aditiva, Modelado de Sonido, Sonido Digital, Matlab, Música.

Abstract

In this TFG it is proposed to create a data base of musical instrument models with the purpose of being able to synthesize their sounds in a simple way. Both the modeling and synthesizing work Will be done with the help of Matlab.

Usually, the synthesis of musical instruments starts from a harmonic model, or in a more generic case, from a model of arbitrary tonal componets that are called partials. Through spectral análisis techniques, the aim is to characterize the harmonics or the partials of different instruments, in order to be able to synthetize them the using an additive synthesis model. These kind of models are not always realistic, since they lose the information of the temporal evelope of the sounds emitted by each instrument. Therefore, to improve the modeling of the instruments, a temporal analysis of the sounds emitted by the musical instruments will also be done in order to characterize the temporal envelope of the instruments.

Finally, the implementation of a musical instrument synthesizer will be proposed, also developed in MATLAB, in order to generate synthesized sounds with a tone, amplitude, duration and instrument model chosen by the user, which could transcribe scores to synthesize any musical composition.

Keywords

Additive Synthesis, Sound Modelling, Digital Sound, Matlab, Music.

Índice

Resumen.....	2
Palabras Clave.....	2
Abstract.....	3
Keywords.....	3
1. Introducción y objetivos.....	7
1.1 Presentación.....	7
1.2 Objetivos.....	7
1.3 Metodología.....	7
1.4 Organización de la memoria.....	8
2. El sonido y la música.....	9
2.1 Las ondas sonoras.....	9
2.1.1 La frecuencia fundamental y los armónicos.....	9
2.1.2 La fase.....	10
2.2 Cualidades del sonido en la música.....	11
2.2.1 La intensidad y sonoridad.....	11
2.2.2 El tono.....	12
2.2.3 El timbre.....	13
2.2.4 La duración.....	14
2.3 Las escalas musicales.....	14
3. Análisis del sonido.....	16
3.1 El espectro de frecuencias.....	16
3.1.1 La transformada de Fourier [7].....	18
3.2 La envolvente ADSR.....	20
4. Síntesis musical.....	21
4.1 Tipos de síntesis.....	22
4.1.1 Síntesis aditiva.....	22
4.1.2 Síntesis sustractiva.....	23
4.1.3 Síntesis por modulación de frecuencia (FM).....	23
4.1.4 Síntesis Granular.....	24
4.1.5 Síntesis por Tabla de ondas (<i>Wavetable</i>).....	24
4.2 Sistema MIDI [9].....	25
5. Modelado de instrumentos mediante MATLAB.....	27
5.1 Instrumentos de cuerda.....	30
5.2 Instrumentos de viento-madera.....	34
5.3 Instrumentos de viento-metal.....	36

6. Síntesis aditiva mediante MATLAB	40
7. Conclusiones.....	45
8. Bibliografía.....	46

Índice de Ilustraciones

Figura 1: Composición de una onda mediante senos simples.....	10
Figura 2: Composición de una onda con desfase.....	10
Figura 3: Curvas isofónicas calculadas por Robinson y Dadson (I.S.O 226).....	12
Figura 4: Escala Mels propuesta por Stevens, Volkman y Newman.....	13
Figura 5: Figuras musicales.....	14
Figura 6: Relación de frecuencias en intervalos musicales.....	15
Figura 7: Escala del temperamento igual.....	16
Figura 8: División del espectro de frecuencias.....	17
Figura 9: Relación entre armónicos y octavas.....	17
Figura 10: Descomposición de una onda compleja mediante la Transformada de Fourier.....	19
Figura 11: Relación de magnitudes en dominios tiempo-frecuencia mediante la Transformada de Fourier.....	19
Figura 12: Envoltente ADSR.....	20
Figura 13: Envoltente ADSR del piano y el violín.....	20
Figura 14: Sintetizador Modular Moog.....	21
Figura 15: Diagrama de un sintetizador aditivo.....	22
Figura 16: Diagrama de síntesis sustractiva.....	23
Figura 17: Diagrama de síntesis FM.....	23
Figura 18: Proceso de síntesis granular asíncrona.....	24
Figura 19: Representación gráfica de una tabla de ondas.....	25
Figura 20: Estructura binaria de un mensaje MIDI.....	25
Figura 21: Mensajes MIDI.....	26
Figura 22: Notación MIDI.....	27
Figura 23: Espectro frecuencial de la guitarra.....	30
Figura 24: Envoltente de la guitarra.....	30
Figura 25: Espectro frecuencial del Banjo.....	31
Figura 26: Envoltente del Banjo.....	31
Figura 27: Espectro frecuencial del violín.....	32
Figura 28: Envoltente del violín.....	32
Figura 29: Espectro frecuencial del piano.....	33
Figura 30: Envoltente del piano.....	33
Figura 31: Espectro frecuencial del oboe.....	34
Figura 32: Envoltente del oboe.....	34
Figura 33: Espectro frecuencial de la flauta.....	35
Figura 34: Envoltente de la flauta.....	35
Figura 35: Espectro frecuencial del clarinete.....	35
Figura 36: Envoltente del clarinete.....	36
Figura 37: Espectro frecuencial de la trompeta.....	37
Figura 38: Envoltente de la trompeta.....	37
Figura 39: Espectro frecuencial de la tuba.....	38
Figura 40: Envoltente de la tuba.....	38
Figura 41: Espectro frecuencial del trombón.....	39
Figura 42: Envoltente del trombón.....	39

1.Introducción y objetivos

1.1 Presentación

Mediante los avances electrónicos y tecnológicos, se han desarrollado métodos de síntesis con el fin de imitar instrumentos musicales reales y crear sonidos innovadores. Los sintetizadores son una herramienta muy útil y utilizada para la producción de la música en la actualidad.

Los primeros sintetizadores fueron analógicos, contaban con elementos electrónicos como osciladores y generadores. Más adelante, con la aparición de las técnicas digitales, aumentó la flexibilidad y facilidad para la síntesis musical, mediante su uso en los ordenadores.

Existen distintos tipos de síntesis musical, como lo son la síntesis aditiva, síntesis sustractiva, síntesis por modelado de frecuencia, entre otras, cada una con el mismo fin de sintetizar sonidos, sin embargo, cada una cuenta con una técnica distinta de la cual depende el resultado final.

El fin del presente proyecto es el estudio de las características sonoras necesarias para recrear el timbre de distintos instrumentos musicales y el desarrollo de la síntesis aditiva mediante MATLAB. Se trabajará con la síntesis aditiva ya que es conveniente para el objetivo de imitar el sonido de instrumentos musicales existentes debido a la técnica que emplea, en la cual es necesaria el modelado previo de los mismos.

La herramienta de programación usada en este proyecto es MATLAB, debido a su amplio uso dentro de la ingeniería, y la capacidad y flexibilidad que contiene a la hora del estudio del sonido, mediante las cuales posible realizar el modelado de los instrumentos y la síntesis aditiva.

1.2 Objetivos

Los objetivos pretendidos en este proyecto se muestran a continuación:

- Modelado y análisis de instrumentos musicales, en concreto instrumentos de cuerda, viento-madera y viento-metal.
- Síntesis de los instrumentos modelados, mediante el método de síntesis aditiva.
- Proposición de dos modelos para cada instrumento en la síntesis: uno mediante los datos obtenidos a partir del análisis espectral y otro agregando los datos obtenidos a partir del análisis de la señal del sonido de los instrumentos en el dominio del tiempo.
- Capacidad del sintetizador de generar composiciones musicales con los tonos, amplitudes, duración y modelo de instrumento elegidos por el usuario. Con un formato sencillo similar al estándar MIDI.

1.3 Metodología

El proyecto se ha organizado de forma en la que se diferencian tres partes.

Primero, el estudio de los distintos conceptos teóricos necesarios para el desarrollo de los objetivos técnicos planteados.

Luego se realizará el modelado de los instrumentos, el análisis espectral y temporal de los sonidos con el fin de obtener los valores objetivos que posteriormente serán necesarios para la imitación de los instrumentos en la síntesis.

Por último, se implementará una función en MATLAB de síntesis aditiva capaz de generar melodías con el modelo de instrumento elegido por el usuario con un formato sencillo similar al estándar MIDI.

1.4 Organización de la memoria

La memoria cuenta con las siguientes fases:

- **Introducción y objetivos.** En este capítulo se realiza la presentación del proyecto, así como los objetivos planteados y los métodos necesarios para llevarlo a cabo.
- **Conceptos teóricos del sonido en la música.** Se muestran conceptos necesarios para entender la relación de los parámetros físicos y matemáticos con la teoría musical.
- **Conceptos teóricos aplicados en el análisis del sonido.** En esta fase se presentarán las técnicas necesarias, tanto el estudio del espectro frecuencial del sonido como el estudio de éste en el dominio del tiempo, necesarios para el modelado de instrumentos.
- **Definición de la síntesis musical.** Se presentará una breve historia de los sintetizadores, la definición del mismo y los distintos tipos de técnicas de síntesis existentes.
- **Modelado de instrumentos mediante MATLAB.** En esta fase se aplicarán los métodos de análisis de sonido, previamente estudiados, con el fin de obtener los parámetros objetivos de los distintos instrumentos mediante MATLAB.
- **Síntesis aditiva de instrumentos mediante MATLAB.** Se creará una función en MATLAB capaz de sintetizar piezas musicales con los instrumentos modelados anteriormente.
- **Conclusiones.** Se presentan las conclusiones alcanzadas a la hora de finalizar el proyecto, junto con un breve repaso del mismo.
- **Bibliografía.** Se detallan las distintas fuentes de información utilizadas para la realización del proyecto.

2.El sonido y la música

El sonido se puede definir como el conjunto de ondas mecánicas que se propagan a través de medios elásticos. Para que se produzca el sonido se requiere la existencia de un cuerpo vibrante y la de un medio elástico que transmita esas vibraciones, que se propagan por él constituyendo la onda sonora.

Físicamente el ruido presenta el mismo concepto del sonido, sin embargo, se pueden distinguir ya que el ruido produce sensaciones desagradables en el oído. Cuando se tiene en cuenta las gráficas de las vibraciones se observa que mayormente los sonidos musicales poseen ondas sinusoidales con variaciones debido a sus armónicos y cada armónico presenta una periodicidad en el tiempo, el ruido en cambio carece de periodicidad y por ello causa una sensación desagradable en el oyente. [1]

2.1 Las ondas sonoras

Una onda sonora consiste en la alteración de la presión del aire producida por una vibración proveniente de instrumentos musicales, cuerdas vocales, altavoces o cualquier objeto que presente una vibración en el rango de frecuencias audibles para los humanos, desde 20Hz hasta 20kHz.

Mediante el Teorema de Fourier se demuestra que las ondas complejas, mientras sea periódica, se pueden separar en los distintos componentes que la conforman, formando así varias sumas de senos simples. Por lo tanto, las ondas sonoras de la voz y la música parten de una función simple de seno, la cual se expresa con la siguiente ecuación:

$$y = A \text{ sen } (2\pi ft + \varphi) \quad (1)$$

En donde A es la amplitud, f es la frecuencia, t es el tiempo y φ es la fase en el instante inicial de la oscilación. Es interesante estudiar cada parámetro de la función para entender la síntesis aditiva.

2.1.1 La frecuencia fundamental y los armónicos

La frecuencia se trata de la cantidad de ciclos que se completan por segundo, la unidad de medida es el Hertz (Hz). Las ondas periódicas complejas contienen una frecuencia fundamental y los armónicos de ésta.

La frecuencia fundamental es la más baja presente en la onda sonora, mientras que los armónicos son frecuencias múltiplo de la fundamental. Cada armónico presenta su propia amplitud y en las frecuencias más altas decrece hasta llegar a cero.

En la figura 1 se logra ver el resultado final de una onda compleja al sumar frecuencias con sus múltiplos.

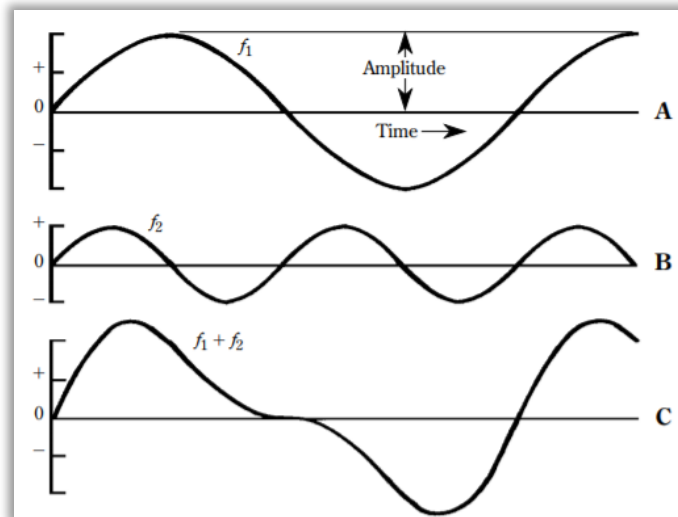


FIGURA 1: COMPOSICIÓN DE UNA ONDA MEDIANTE SENOS SIMPLES

2.1.2 La fase

La definición de fase consiste en el estado de vibración de un punto de la onda. Dos puntos están en fase cuando coinciden en velocidad y elongación. La fase de cada componente de la onda debe iniciar en cero para que no ocurra un desfase. En el caso que cada onda empiece por fases distintas, la forma de la onda compleja se deformaría de manera notable. Sin embargo, el oído humano es relativamente insensible a estas modificaciones y al escucharlo no implicaría una diferencia significativa a una onda en fase. En el caso de que distintos componentes consten de la misma frecuencia, si tienen desfase de 90° o 180° sería distinto para la percepción auditiva, ya que con la diferencia de 90° varía la amplitud de las ondas y con 180° se cancelarían entre ellas [5].

En la figura 2 se nota la deformación de la onda final causada por el desfase, se logra ver una diferencia considerable respecto a la figura 1.

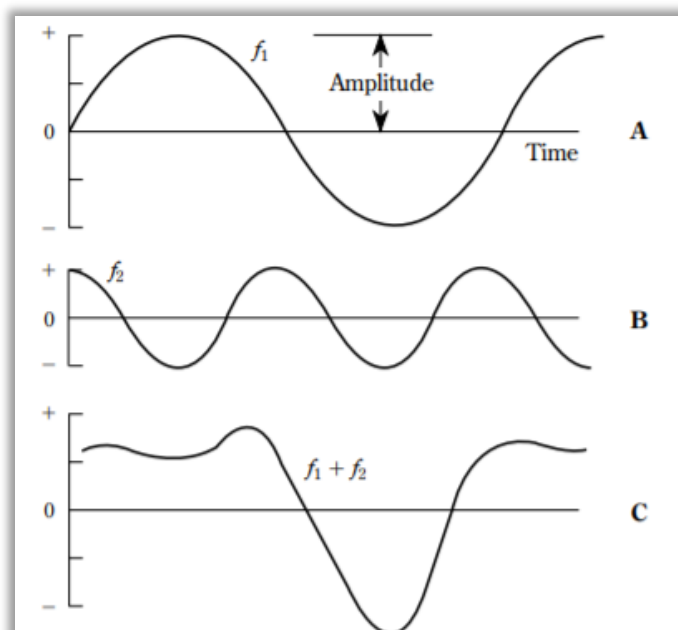


FIGURA 2: COMPOSICIÓN DE UNA ONDA CON DESFASE

2.2 Cualidades del sonido en la música

Los distintos sonidos en la música están caracterizados principalmente por cuatro cualidades: la intensidad, el tono, el timbre y la duración. Cada una depende de parámetros físicos como lo son la frecuencia, la presión sonora, los armónicos, la envolvente, entre otros.

2.2.1 La intensidad y sonoridad

La intensidad de sonido consiste en la cantidad de energía acústica que contiene un sonido. La intensidad percibida subjetivamente por los humanos se denomina sonoridad y es la cualidad con la cual se logra distinguir si un sonido es suave o fuerte.

La intensidad depende de la amplitud de las vibraciones y viene definida por la potencia acústica (A) que transfiere una onda sonora por unidad de área normal a la dirección en que la que ocurre la propagación (N).

$$I = \frac{A}{N} \quad (2)$$

La unidad de la intensidad, estandarizada por el Sistema Internacional de Unidades, es el vatio por metro cuadrado ($\frac{W}{m^2}$).

Sin embargo, la sensación del nivel del sonido no solo depende de la intensidad objetiva, también afecta la sensibilidad del oído de cada persona. El oído humano puede escuchar sonidos en el rango de intensidad desde $10^{-12} \frac{W}{m^2}$ hasta $1 \frac{W}{m^2}$, siendo éstas el umbral de audición y el umbral de dolor respectivamente.

Para expresar la sonoridad es habitual usar el decibelio (dB), viene dada por la siguiente expresión:

$$LI = 10 \log \left(\frac{I}{I_{ref}} \right) \quad (3)$$

Donde I_{ref} es el umbral de audición ($10^{-12} \frac{W}{m^2}$).

Está demostrado que la sonoridad percibida varía según la frecuencia y el nivel de intensidad sonora. Los primeros en trabajar en ello fueron Fletcher y Munson en los Laboratorios Bell en 1933, las investigaciones siguieron hasta que se adoptó como standard internacional (I.S.O 226) las curvas isofónicas estudiadas por Robinson y Dadson. [5]

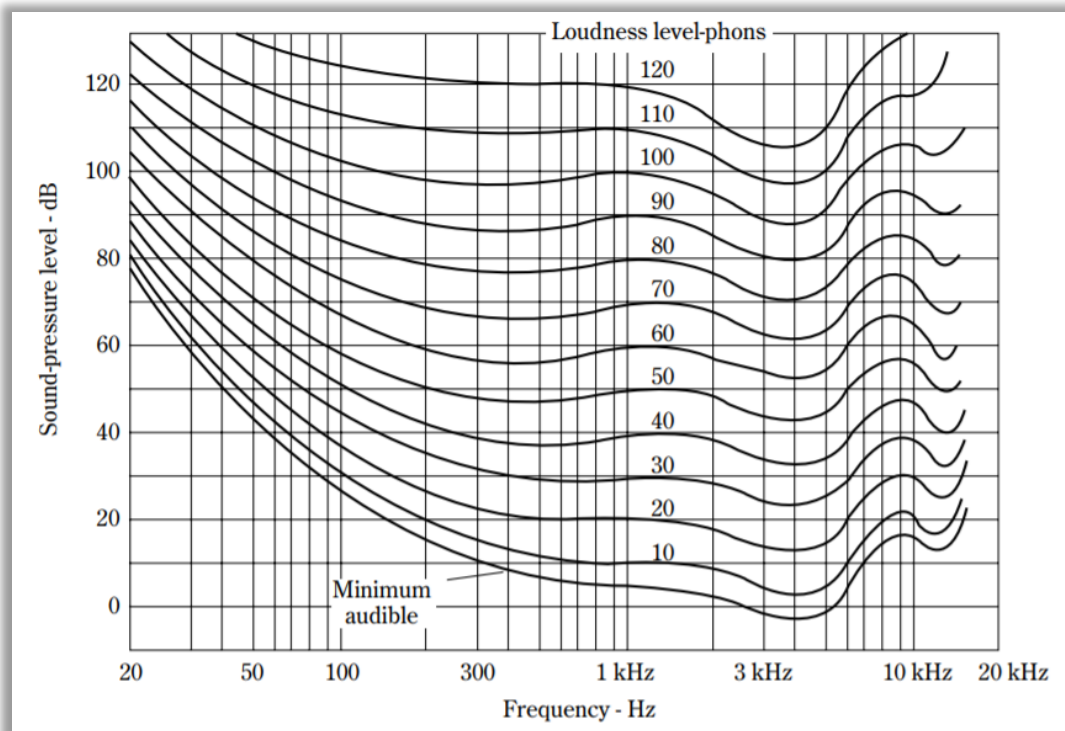


FIGURA 3: CURVAS ISOFÓNICAS CALCULADAS POR ROBINSON Y DADSON (I.S.O 226)

En la figura 3 se logra ver que las curvas isofónicas se vuelven más planas mientras aumenta la intensidad, es decir, la dependencia de la frecuencia es más relevante cuando hay niveles bajos de intensidad. El oído humano tiene menos sensibilidad para las notas de bajas frecuencias que para las medias y altas. [5]

2.2.2 El tono

El tono es una cualidad que viene determinada por la frecuencia, permite distinguir si un sonido es agudo o grave. Mientras mayor sea la frecuencia de la onda, más agudo será el sonido y al ser menor la frecuencia, más grave sonará el mismo.

La función de un tono puro corresponde a la de una onda senoidal, donde f es la frecuencia, t es el tiempo y A es la amplitud:

$$f(t) = A \text{sen}(2\pi ft) \tag{4}$$

Las ondas periódicas se expresan como la suma de varios tonos puros de distintas frecuencias, la frecuencia fundamental y los múltiplos de ésta, llamados armónicos. [2]

La forma en la que se percibe el tono según la psicoacústica se conoce como la altura del sonido, mediante la cual se determina bajo y alto como grave y agudo, respectivamente. Es normal que “tono” y “altura” sean sinónimos en lo que respecta a la música. [3]

La relación entre el tono y la frecuencia se puede observar a través de experimentos realizados por Stevens, Volkman y Newmann en 1937. Para ello invitaron a grupos de personas a juzgar tonos percibidos para así crear una escala llamada la Escala Mel, en la cual se aprecia la relación entre las frecuencias y el tono con unidad de medida subjetiva llamada “mels” (Figura 4). [5]

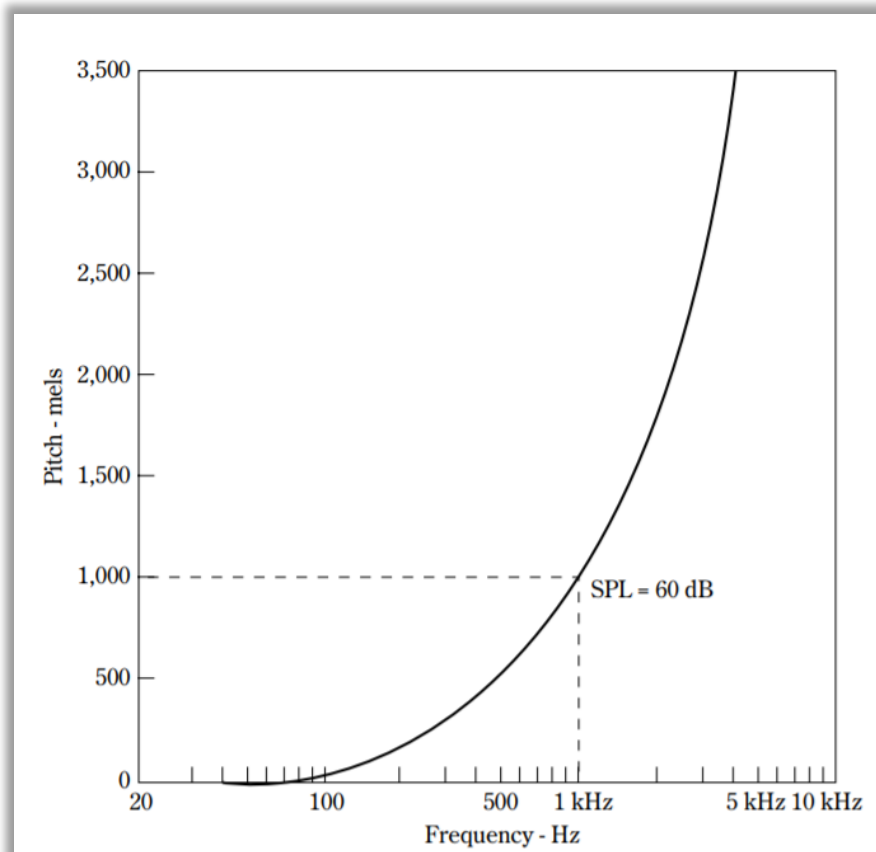


FIGURA 4: ESCALA MELS PROPUESTA POR STEVENS, VOLKMAN Y NEWMAN

2.2.3 El timbre

El timbre es la cualidad que permite el reconocimiento de la fuente sonora, aún cuando tienen el mismo tono, frecuencia fundamental e intensidad. El oído puede identificar si un instrumento es de viento, cuerda o percusión, así como las diferentes voces de cada persona debido al timbre de los mismos.

Así como lo demuestra el Teorema de Fourier, cualquier onda periódica se descompone en una serie de ondas con distintas frecuencias múltiplo de la frecuencia fundamental, las cuales son conocidas como armónicos. Esto ocurre en las ondas de sonido y el timbre dependerá principalmente del número de armónicos y la intensidad de cada uno, estos parámetros se pueden obtener a través del espectro mediante un analizador de ondas. Los armónicos son distintos según la fuente, el tipo de instrumento y la forma en la que se toca el mismo instrumento.

Aunque el espectro de las frecuencias muestra los parámetros de forma objetiva, el timbre es una cualidad subjetiva ya que para describirlo interviene la interpretación del oído humano. [5]

El timbre también depende de la envolvente que contiene la amplitud del sonido, la variación de la amplitud en el tiempo. En general las distintas fuentes presentan una forma específica de envolvente que se caracteriza por cuatro momentos en el tiempo: el ataque, la caída, el sostenimiento y la relajación, lo cual se conoce como la envolvente ADSR. [4]

2.2.4 La duración

El tiempo en el que se mantienen las ondas de un sonido se denomina duración. Los sonidos se pueden distinguir según la duración de los mismos.

Por ejemplo, al tocar una nota en una trompeta las ondas tienen una duración larga mientras que al tocar la cuerda de una guitarra ésta se disminuye y al tocar algún instrumento de percusión, como un tambor, es bastante corta.

En la teoría musical, la duración se representa mediante las figuras musicales, las cuales son: La cuadrada, redonda, blanca, negra, corchea, semicorchea, fusa, semifusa, garrapatea y semigarrapatea. La redonda se toma como punto de referencia para asignar el valor a las demás notas: 16 semicorcheas, 8 corcheas, 4 negras y 2 blancas tienen la misma duración que una redonda, así como es posible observarlo en la figura 5. En los compases musicales, la figura que representa la unidad es la negra, por lo tanto, un pulso equivale a una negra.

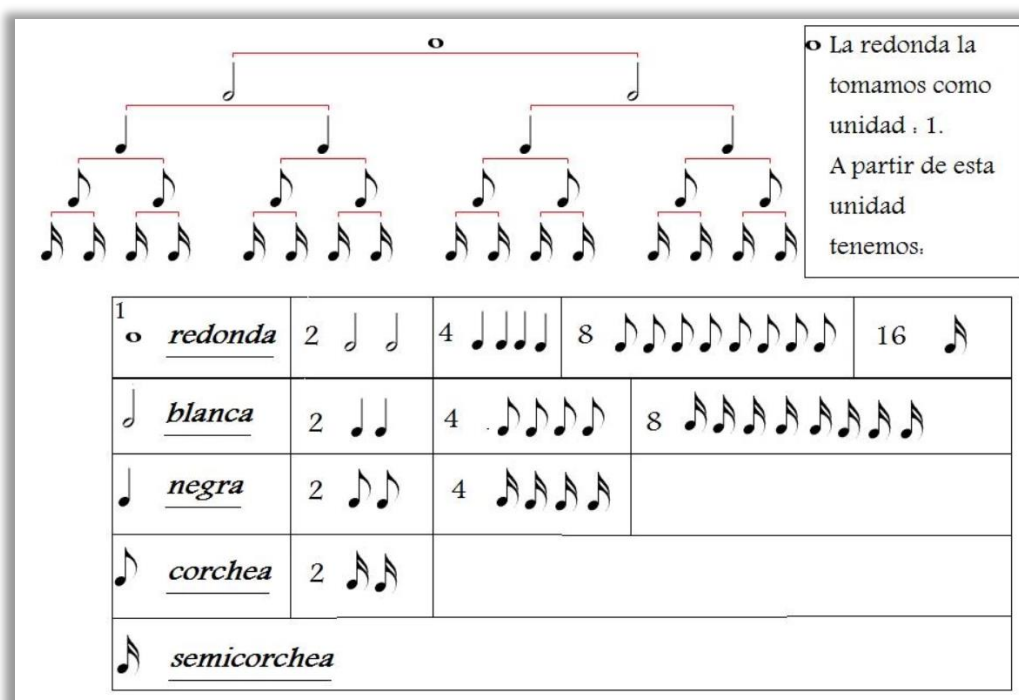


FIGURA 5: FIGURAS MUSICALES

Aunque las figuras musicales siempre tienen la misma equivalencia entre ellas, la duración en unidad de tiempo lo define el tempo musical. El tempo se mide en BPM (pulsos por minuto) y su valor depende de la elección del compositor de la música. El tempo indica la cantidad de pulsos de figuras negras por minuto. Por lo tanto, si es igual a 100 BPM el valor de la negra será el de 100 pulsaciones de negra cada minuto, lo que resultaría alrededor de 1.6 segundos y sabiendo la equivalencia entre las figuras se podría determinar la duración de cada una en unidad de tiempo.

2.3 Las escalas musicales

La música podría definirse como un arte basado en sonidos y silencios, los cuales tienen un orden creativo y técnico a su vez. Este orden varía según culturas, gustos subjetivos personales y géneros musicales, sin embargo, existen reglas básicas que están presentes en cualquier variación de la música y por ello surgen las escalas musicales, creadas a partir de la matemática.

Las escalas musicales son un conjunto discreto de alturas puestas de tal forma en que se obtenga un máximo número posible de combinaciones cuando varias notas del conjunto son tocadas al mismo tiempo. Cualquier música basada en tonos demuestra que el ser humano escucha con preferencia ciertos intervalos de frecuencia, como lo son la octava y la quinta, esta preferencia no solo es solo subjetiva, mientras más número de armónicos coincidentes y menor número de armónicos no coincidentes tengan dos notas mejor sonarán, a lo que se llama consonancia y en el caso contrario se le conoce como disonancia y es posible demostrarlo matemáticamente de la siguiente forma:

$$\frac{f_1}{f_{1'}} = \frac{n}{m} \quad (5)$$

En donde f_1 y $f_{1'}$ son las frecuencias fundamentales de ambas notas, n y m números enteros. En la figura 6 se puede observar la relación de frecuencias en los intervalos más usados en la música, todos cumpliendo la consonancia [7].

Razón de frecuencias (n/m)	Intervalo
Consonancias «perfectas»	1/1 Unísono
	2/1 Octava
	3/2 Quinta
	4/3 Cuarta
Consonancias «imperfectas»	5/3 Sexta mayor
	5/4 Tercera mayor
	6/5 Tercera menor
	8/5 Sexta menor

FIGURA 6: RELACIÓN DE FRECUENCIAS EN INTERVALOS MUSICALES

La voz humana y algunos instrumentos como los de cuerda frotada (violín, violonchelo, entre otros) tienen la capacidad de producir tonos indefinidos dentro del rango auditivo humano, sin embargo, no ocurre lo mismo para los instrumentos musicales de afinación limitada ya que éstos se afinan con notas de altura fija, con doce sonidos por octava con una frecuencia estandarizada.

En la música occidental el sistema más utilizado es el sistema de **temperamento igual**, el cual se refiere a una afinación construida de tal forma en la que los semitonos de la octava están divididos en partes iguales, la relación entre una nota y el siguiente semitono es de $\sqrt[12]{2}$ (Figura 7). Los valores de las frecuencias de cada nota en el temperamento igual se conocen mediante la expresión número 6.

$$f(n) = (\sqrt[12]{2})^{n-n_0} f_0 \quad (6)$$

En la expresión, $f(n)$ es el valor de la frecuencia a calcular, n el número de la nota musical a calcular, n_0 el número de tecla base y f_0 el valor de la frecuencia base. La *Organización Internacional de Normalización* ha estandarizado como nota base de afinación la nota LA_4 con el valor fijo de frecuencia de 440 Hz (norma ISO 16).

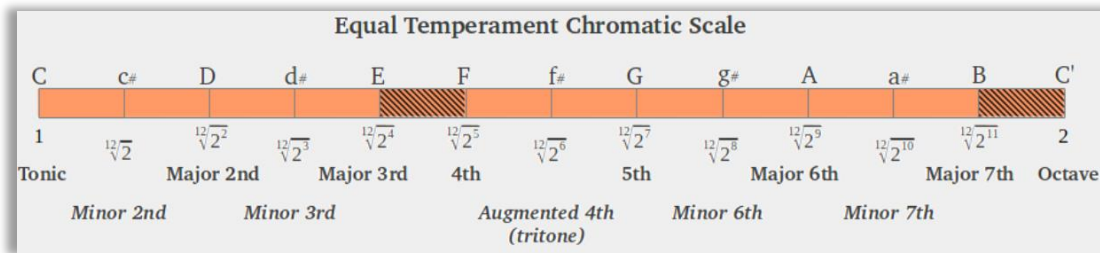


FIGURA 7: ESCALA DEL TEMPERAMENTO IGUAL

3. Análisis del sonido

Como se ha mencionado antes, existen parámetros físicos que forman parte en la definición de las cualidades subjetivas del sonido, en análisis de éstos es una acción importante para el fin de realizar un modelado de instrumentos musicales.

Las formas principales de analizar el sonido son mediante la visualización del espectro de frecuencias y el desarrollo temporal de la señal que se quiere estudiar, que en el caso de los instrumentos musicales es natural la aparición de una envolvente conocida como “envolvente ADSR”.

3.1 El espectro de frecuencias

El espectro de frecuencias se caracteriza por mostrar la forma en que la energía de la señal se distribuye en las frecuencias. El conocimiento del espectro permite el acceso a las magnitudes de las frecuencias de una señal. La representación espectral no permite observar la evolución temporal de la señal, si no que permite evaluar instantáneamente las características de un segmento de ésta.

Las señales de audio usualmente son complejas en el desarrollo temporal y para analizarlas es muy útil el uso del espectro de frecuencias, ya que aporta información de sencilla lectura. La equivalencia de la representación temporal y espectral de las señales se dan por transformaciones definidas por la Transformada de Fourier.

Al realizar un análisis espectral se descompone las frecuencias dentro del intervalo audible humano (de 20 a 20 kHz) en bandas de octava, y se determina el nivel de presión sonora correspondiente a cada banda. En las bandas de octava se cumple que la frecuencia superior de la banda es el doble de su frecuencia inferior, como se puede observar en la figura 8.



FIGURA 8: DIVISIÓN DEL ESPECTRO DE FRECUENCIAS

En la música es frecuente usar las octavas, el cual es un concepto logarítmico que determina las terminologías y escalas musicales debido a la relación que tiene con la naturaleza del oído humano. Por ello es común el uso de escalas logarítmicas para las medidas del sonido. [5]

Los armónicos, definidos en el apartado 2.1.1, y las octavas están relacionados de tal forma en la que se observa en la figura 9. Los armónicos son lineales mientras que las octavas son logarítmicas.

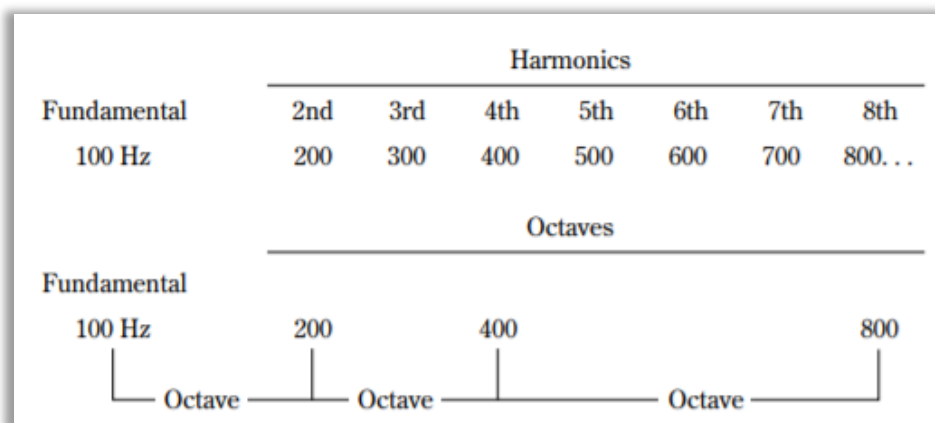


FIGURA 9: RELACIÓN ENTRE ARMÓNICOS Y OCTAVAS

El análisis espectral es muy útil en la práctica ya que permite realizar una gran cantidad de arreglos como la cancelación de ruido, la ecualización y la manipulación de las señales en el procesamiento digital del sonido.

3.1.1 La transformada de Fourier [7]

El Teorema de Fourier demuestra que toda señal periódica compleja puede ser dividida en infinitas sinusoides, las cuales tienen una relación armónica en la cual la frecuencia fundamental contiene el período de la señal compleja que se analiza. Es una herramienta fundamental a la hora de estudiar los parámetros de los sonidos. Fue Jean-Baptiste Joseph Fourier quién descubrió el teorema mientras estudiaba las funciones complejas, al ser capaz de descomponer una función compleja en muchas funciones simples se convirtió mucho más sencillo analizar dichas señales.

Al estudiar una señal periódica y saber su período se conoce instantáneamente que el espectro es armónico y el valor de la frecuencia de cada armónico, sin embargo, antes de aplicar el Análisis de Fourier la amplitud de cada armónico es desconocida.

Todos los sonidos periódicos en el dominio del tiempo pueden sintetizarse a través de los coeficientes del desarrollo en series de Fourier. Para demostrarlo se observa que al ser $s(t)$ la amplitud de dicha señal, se espera que ésta se pueda escribir como la suma de un número de tantas funciones armónicas simples como armónicos tenga la señal. El período del primer armónico es el mismo de la señal compleja y por lo tanto éste se podría expresar de la siguiente forma:

$$s_1(t) = A_1 \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1) \quad (7)$$

Con el fin de no tratar con amplitudes y fases al mismo tiempo se usa una identidad trigonométrica y se produce una suma de senos y cosenos, la cual permite reconstruir la función original $s(t)$:

$$s(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n2\pi f_1 t) + b_n \sin(n2\pi f_1 t)) \quad (8)$$

Para reconstruir la señal habría que determinar los coeficientes a_n y b_n , a_0 es el valor medio de la función, el cual casi siempre es cero en las señales acústicas. Los coeficientes se calculan a través de las relaciones de Euler, como se demuestra a continuación:

$$\begin{cases} a_n = \frac{2}{P} \int_0^P f(t) \cos(n2\pi f_1 t) dt \\ b_n = \frac{2}{P} \int_0^P f(t) \sin(n2\pi f_1 t) dt \end{cases} \quad (9)$$

En donde P es el periodo fundamental de la señal. Sin embargo, teniendo como fin la manipulación de las señales en medios electrónicos, se debe tener en cuenta que al tratarse de señales infinitas requieren de muchos cálculos, lo cual no es lo más óptimo para al tratarse de cálculo por ordenador. La solución para esto es la Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*), que es una versión eficiente de la transformada discreta de Fourier y permite reconstruir la señal periódica compleja utilizando una frecuencia de muestreo F_s de la siguiente forma:

$$s(n) = \frac{1}{2} a_0(n) + \sum_{k=1}^{k_{max}} r_k(n) \cos\left(\frac{2\pi f_0}{F_s} + \varphi_k(n)\right) \quad (10)$$

Y los coeficientes:

$$\begin{cases} a_k(n) = r_k(n) \cos(\varphi_k(n)) \\ b_k(n) = r_k(n) \sin(\varphi_k(n)) \end{cases} \quad (11)$$

En la FFT se tiene en cuenta el teorema de muestreo de Nyquist-Shannon para garantizar la construcción de la señal original, por lo tanto, se utiliza un valor k_{max} el cual consiste en el armónico más alto luego de la frecuencia fundamental ($k_{max} < \frac{F_s}{2f_0}$).

También se introduce un coeficiente variable r_k el cual habilita el uso de envolventes que modulen los osciladores, de esta forma se generan las ondas periódicas.

Como resumen práctico del teorema, se puede resaltar que éste permite realizar dos funciones fundamentales durante en análisis del audio: descomponer una onda periódica compleja en los componentes simples que la conformen, como se muestra en la figura 10, y obtener las amplitudes y frecuencias de cada armónico a partir de la señal en el dominio del tiempo, lo cual se observa en la figura 11.

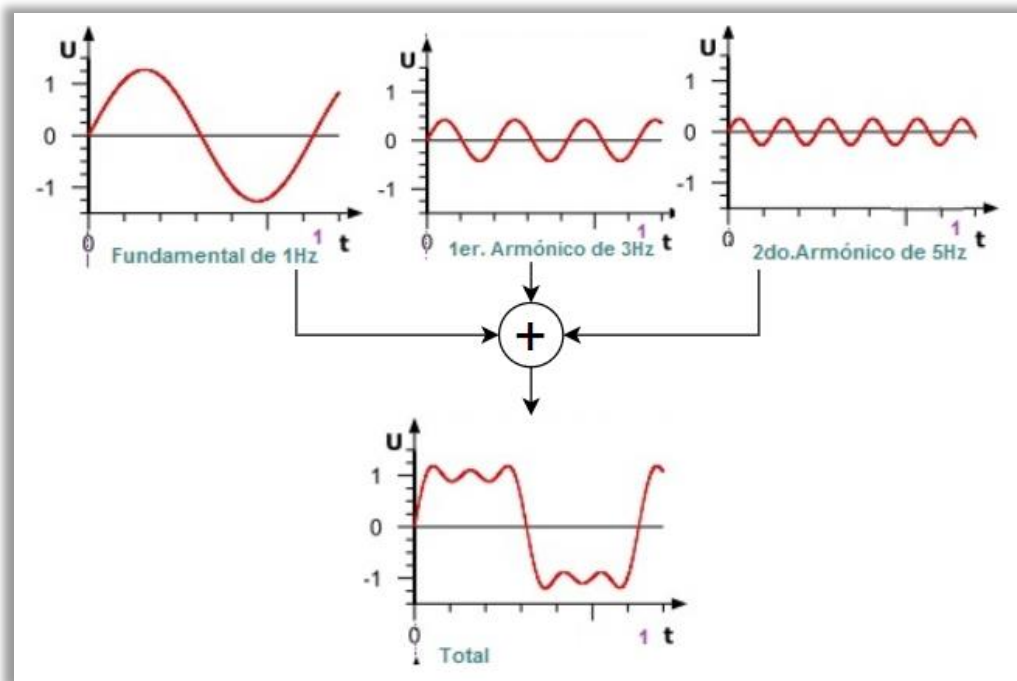


FIGURA 10: DESCOMPOSICIÓN DE UNA ONDA COMPLEJA MEDIANTE LA TRANSFORMADA DE FOURIER

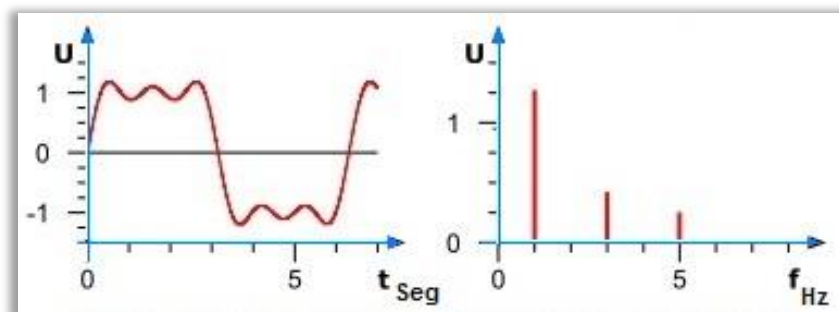


FIGURA 11: RELACIÓN DE MAGNITUDES EN DOMINIOS TIEMPO-FRECUENCIA MEDIANTE LA TRANSFORMADA DE FOURIER

3.2 La envolvente ADSR

Como se ha indicado anteriormente, la forma de la onda sonora en el tiempo influye de manera importante en el timbre. Cada instrumento musical tiene una forma de onda característica y por la naturaleza de éstos se puede describir mediante un modelo llamado ADSR.

La ADSR consiste en una envolvente de cuatro etapas: ataque (A), decaimiento (D), sostenimiento (S) y relajación (R), tal como se observa en la figura 12.

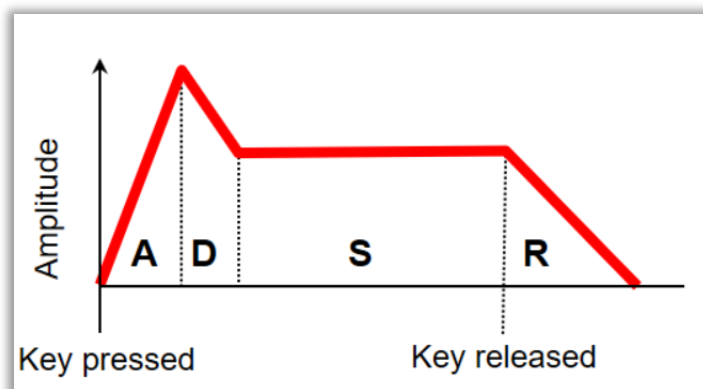


FIGURA 12: ENVOLVENTE ADSR

- El **ataque** se trata del tiempo desde que la onda empieza en cero hasta que alcanza el punto máximo de amplitud.
- El **decaimiento** es el tiempo que tarda la onda en pasar del punto máximo de amplitud hasta un estado de energía estacionario.
- El **sostenimiento** es la duración en la que la onda se mantiene en un estado de energía estacionario, el cual tiene un nivel de amplitud específico.
- La **relajación** consiste en el tiempo en el que la onda finaliza el estado estacionario hasta que su amplitud se convierte en cero.

En la figura 13 se visualiza la diferencia de la forma temporal de las ondas de dos instrumentos, el piano y el violín, y la forma en la que se aplica la envolvente ADSR a éstos.

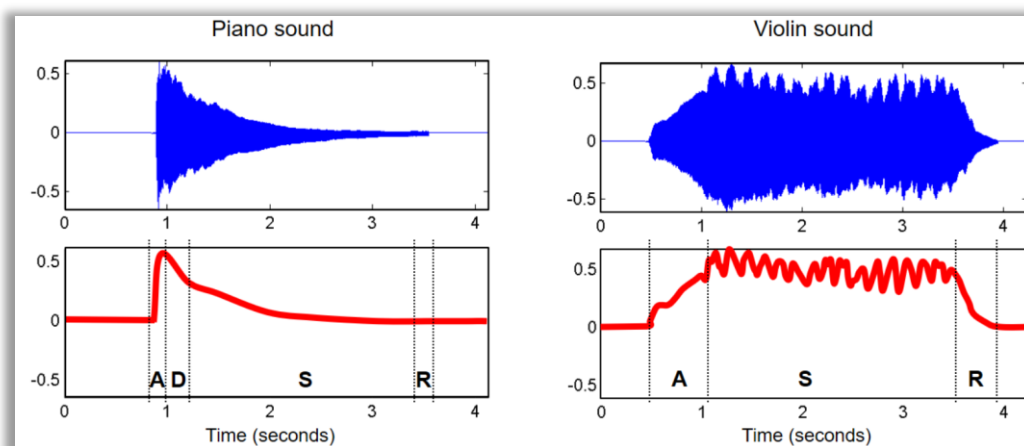


FIGURA 13: ENVOLVENTE ADSR DEL PIANO Y EL VIOLÍN

4. Síntesis musical

La síntesis del sonido consiste en la generación o replicación de sonidos mediante la aplicación de técnicas electrónicas o digitales de tratamiento de señal, en lugar de los medios acústicos tradicionales. El descubrimiento de la síntesis del sonido ha sido de gran importancia en el campo musical de los últimos años, entre otras cosas debido a la oportunidad que ofrece de generar sonidos nuevos, que han aportado innovación en distintos géneros musicales. La síntesis puede ser analógica o digital. Los dispositivos analógicos contienen circuitos electrónicos complejos que tratan señales continuas mientras que los digitales se basan en algoritmos y señales discretas.

Uno de los primeros en desarrollar equipos sintetizadores fue el ingeniero eléctrico y físico Robert Moog, su primera creación que salió en el mercado fue el “*sintetizador Modular Moog*”, el cual contaba con resistencias, transistores, condensadores y válvulas, el control de éstos los tenía el usuario mediante potenciómetros ubicados en el panel del sintetizador, como se puede ver en la figura 14. [5]

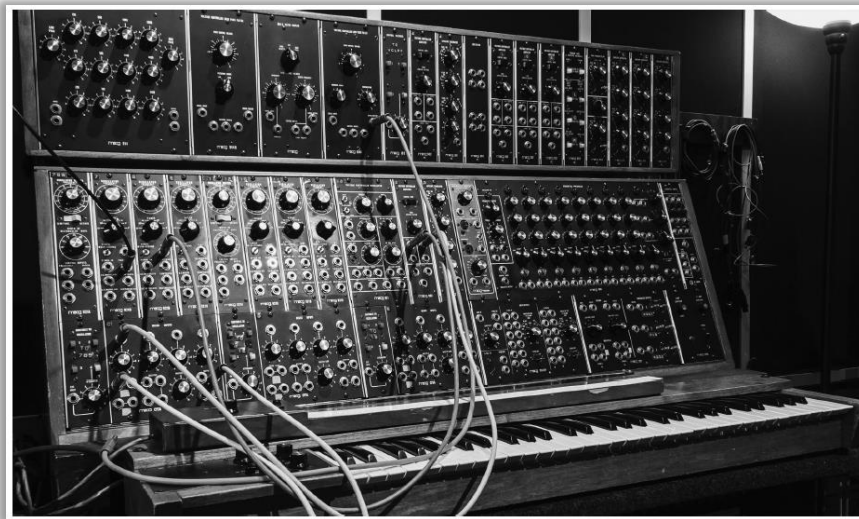


FIGURA 14: SINTETIZADOR MODULAR MOOG

En general, los primeros sintetizadores analógicos contaban con osciladores, distintos tipos de formas de onda, filtros, generadores de envolventes y efectos sobre los sonidos que el usuario podría manipular.

Por otro lado, las técnicas de síntesis digital heredaron los conocimientos desarrollados con los dispositivos analógicos. El primer sistema, llamado Music V, fue desarrollado por Max Mathews en 1969 [8]. Mathews versionó los módulos pertenecientes a los sintetizadores analógicos, reemplazándolos con un generador unitario el cual acepta entradas numéricas de control y genera una señal digital, la cual puede pasar a otro control unitario o ser el sonido de salida. Los generadores unitarios generalmente son los osciladores, los filtros, generadores de envolvente, sumadores, entre otros... A partir de la combinación de estos elementos se generan sonidos similares al resultado por los módulos analógicos, pero con un control mucho más sencillo y preciso. La mayoría de sistemas de síntesis digital en la actualidad parten de estos conceptos [8].

Los algoritmos de síntesis son implementados tanto a nivel de software como de hardware. Mediante software, los algoritmos tienen mayor flexibilidad y complejidad ya que dependen de un lenguaje de programación y la capacidad del ordenador, sin

embargo, es difícil su aplicación a tiempo real, por esta razón la mayoría de sintetizadores comerciales utilizan implementaciones en hardware [8].

4.1 Tipos de síntesis

Existen diferentes técnicas de síntesis aplicadas a los sintetizadores analógicos y digitales, cada una cuenta con procesos diferentes y con el mismo fin de sintetizar sonidos, sin embargo, es importante estudiar la diferencia entre estas ya que algunas son más convenientes que otras según el propósito para el que se quiera sintetizar. Algunas de las más comunes son la síntesis aditiva, la sustractiva, la granular, por modulación, por tabla de ondas y por modelado físico.

4.1.1 Síntesis aditiva

La síntesis aditiva parte de la generación de tonos puros (ondas sinusoidales) y la combinación de éstos para así crear un sonido complejo. Se basa en el Teorema de Fourier, el cual demuestra que cualquier forma de onda periódica tiene la capacidad de ser modelada como suma de sinusoides con distintas frecuencias y amplitudes. En el caso de la síntesis aditiva se aplica una ingeniería inversa del Teorema de Fourier, ya que se suman diversas ondas simples, moduladas con distintas amplitudes y frecuencias, hasta formar una señal compleja. La señal de salida generalmente se expresa de la siguiente forma:

$$y(t) = \sum_{k=1}^n A_k(t) \sin(k2\pi f_0 t + \varphi_k) \quad (12)$$

En donde n es el número de armónicos, A la amplitud del armónico k -ésimo, f_0 es la frecuencia fundamental, t es la duración y φ_k la fase inicial de cada armónico.

Como se logra ver a través de la expresión 12, para aplicar la síntesis aditiva se necesita el conocimiento de tres elementos característicos del sonido que se quiere imitar o crear: la amplitud, la frecuencia fundamental y la fase inicial de cada armónico presente en la señal.

Para la imitación óptima de un instrumento musical, la amplitud de los armónicos debe estar modulada según la envolvente ADSR (explicado en el apartado 3.2) del mismo. En caso de que no se añada la envolvente ADSR y solo se ingrese la amplitud de cada armónico, el resultado será un sonido electrónico, lejos de la naturalidad del instrumento.

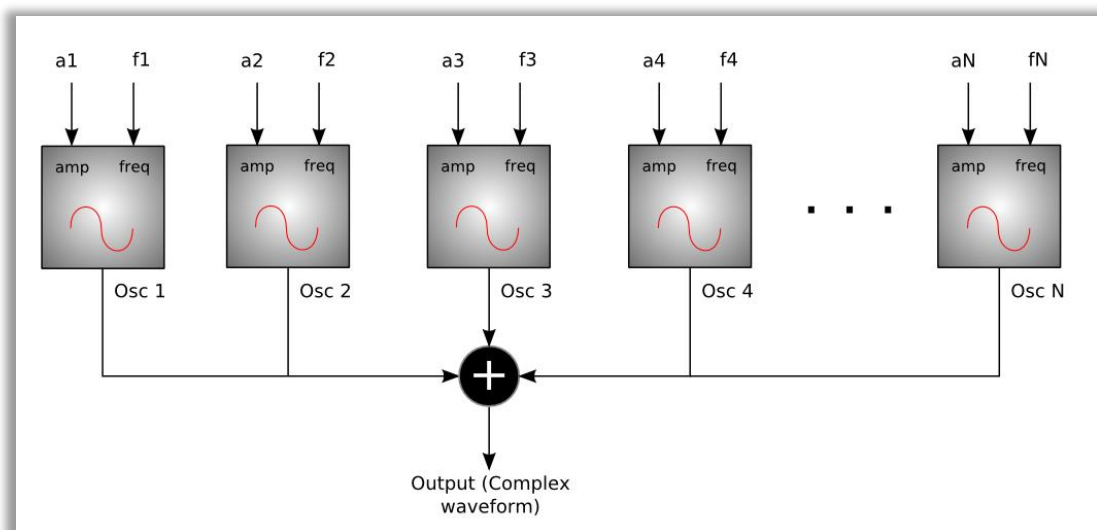


FIGURA 15: DIAGRAMA DE UN SINTETIZADOR ADITIVO

4.1.2 Síntesis sustractiva

La síntesis sustractiva consiste en la emulación de un sonido a partir de una señal inicial compleja, a la cual se procede a sustraer características para así generar el sonido deseado.

El proceso empieza mediante la generación de ondas, las cuales pueden ser sinusoidales, cuadradas, de diente de sierra, triangulares, o ruido, a través de un oscilador. La señal generada consta de distintas frecuencias las cuales pasan por un filtro para así dejar solo las frecuencias de la señal que se quiere emular. Finalmente, la señal pasa por un amplificador el cual controla el nivel de la señal filtrada.

El proceso completo consigue imitar el espectro frecuencial del sonido a emular, tiene limitaciones a la hora de recrear sonidos naturales. Sin embargo, este tipo de síntesis es llamativa ya que ofrece el uso de timbres particulares característicos de sonidos electrónicos clásicos, el uso de este sistema es muy frecuente en los sintetizadores analógicos.

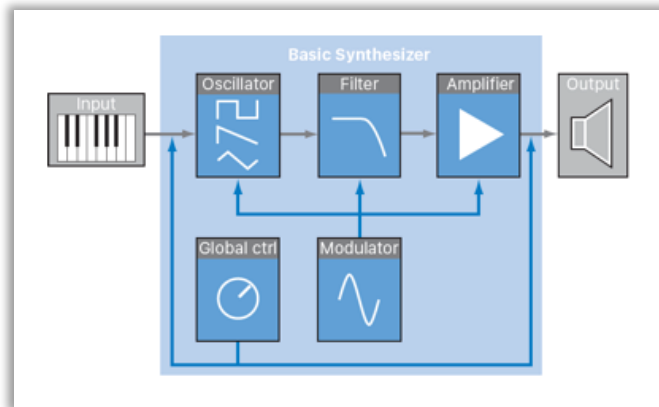


FIGURA 16: DIAGRAMA DE SÍNTESIS SUSTRACTIVA

4.1.3 Síntesis por modulación de frecuencia (FM)

La síntesis por modulación de frecuencia se basa en el uso de al menos dos osciladores, uno con la señal portadora y otro con la señal moduladora. El timbre y la frecuencia fundamental generalmente lo origina la señal portadora, la cual es usualmente controlada mediante un teclado o cualquier medio MIDI. Por otro lado, la señal moduladora tiene el fin de modificar la portadora con un índice de modulación específico, el cual determina la amplitud y cantidad de cada uno de los componentes (armónicos) en el espectro de la señal de salida.

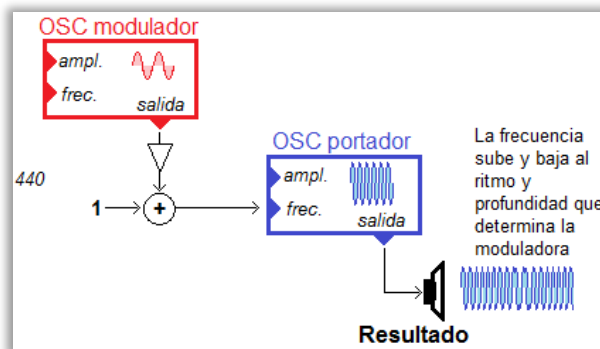


FIGURA 17: DIAGRAMA DE SÍNTESIS FM

La síntesis por modulación de frecuencia generalmente produce formas de ondas que no son habituales en la naturaleza, por esta razón no es ideal para la imitación de sonidos encontrados en instrumentos musicales.

4.1.4 Síntesis Granular

Consiste en la síntesis de sonidos a partir de elementos muy pequeños de señal en el dominio del tiempo, los cuales se conocen como sonidos atómicos o granos. Los granos pueden tener una duración aproximada desde uno a cien milisegundos. Cada grano se genera a partir de una forma de onda obtenida mediante otro método de síntesis y cuenta con tres parámetros: frecuencia, duración y forma de onda.

La síntesis granular de mayor uso es la asíncrona (AGS), los granos se obtienen mediante una dispersión de éstos en una zona característica denominada “nube” en el dominio de frecuencia. Es un proceso repetitivo y aleatorio en el que ocurre la creación de granos con distintas frecuencias y duraciones hasta tener una gran densidad de éstos. Finalmente, cada grano obtenido es multiplicado por una envolvente con el fin de eliminar sonidos bruscos de clicking, que ocurriría debido a la transición de distintos granos.

En la figura 19 es posible observar las nubes y que cada punto en éstas representa un grano con una frecuencia y duración particular.

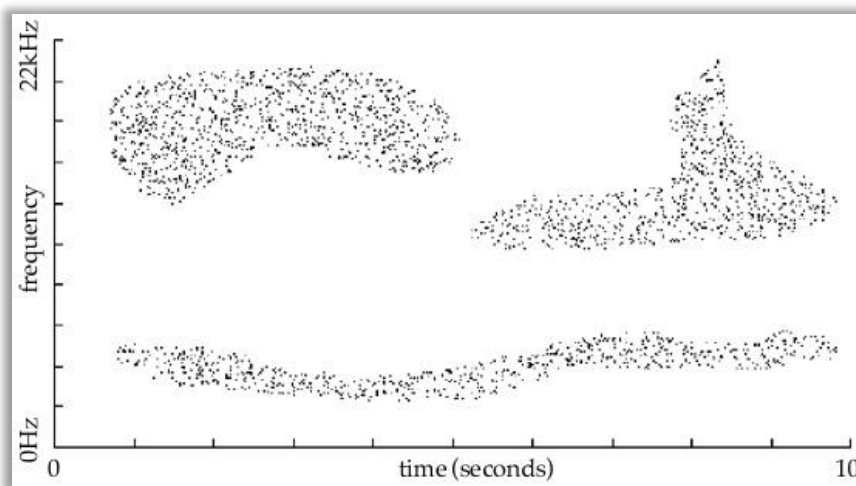


FIGURA 18: PROCESO DE SÍNTESIS GRANULAR ASÍNCRONA

Con esta técnica es posible crear sonidos no periódicos, como los de objetos no musicales o efectos nuevos, y por lo tanto no es conveniente a la hora de sintetizar sonidos con el fin de imitar instrumentos musicales acústicos.

4.1.5 Síntesis por Tabla de ondas (*Wavetable*)

Este método de síntesis es utilizado generalmente para producir música de forma digital. Contiene una tabla con una gran cantidad de formas de onda almacenadas a partir de muestras procedentes de sonidos, las cuales son modificadas por el usuario mediante un interfaz. Al tocar una nota en el dispositivo, empieza una secuencia de ondas predeterminadas con el mismo ciclo que están almacenadas en la tabla, generalmente con aplicación de modulaciones a la señal, lo que genera cambios en su forma con transiciones sutiles en el tiempo.

La síntesis por tabla de ondas es bastante relevante ya que la mayoría de tarjetas de sonido y sintetizadores en el mercado actual constan con alguna variante de ésta. Se

debe tener en cuenta la capacidad de los dispositivos para aplicar esta técnica, ya que, para reconstruir los distintos sonidos, los sintetizadores deben contener espacio de almacenamiento capaz de almacenar la cantidad de fragmentos de audio de excelente calidad que contiene las tablas y la velocidad de procesamiento requerida para la lectura de éstas.

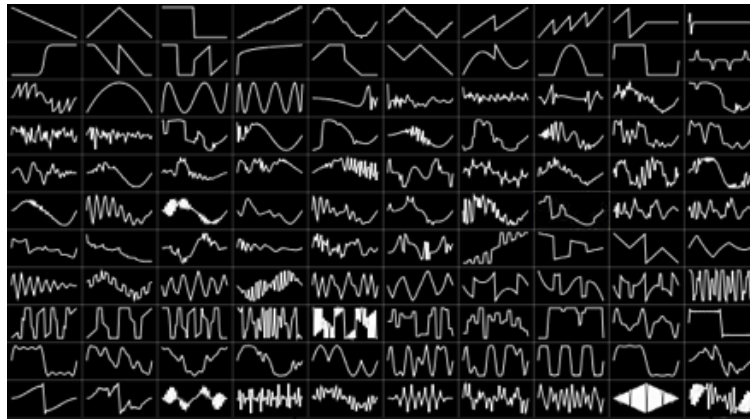


FIGURA 19: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE UNA TABLA DE ONDAS

4.2 Sistema MIDI [9]

El sistema MIDI (*Musical Instrument Digital Interface*) consiste en un conjunto de instrucciones simples y estandarizadas que comunican a un instrumento electrónico las notas que debe reproducir, y las características que deben tener. Surgió a partir de la aparición de los sintetizadores digitales, ya que no existía una forma de interconexión entre ellos, la solución ocurrió en 1983, cuando fue estandarizado por un grupo llamado MIDI Manufactures, representantes en la industria de fabricantes de instrumentos musicales y desde entonces se hizo posible la comunicación entre instrumentos digitales de distintas marcas.

Los mensajes MIDI están compuestos por tres bytes, uno de estado y los dos restantes de datos. En el byte de estado se determina el tipo de mensaje y el canal que lo recibe, los bytes restantes dependen de éste, como se observa en la figura 20.

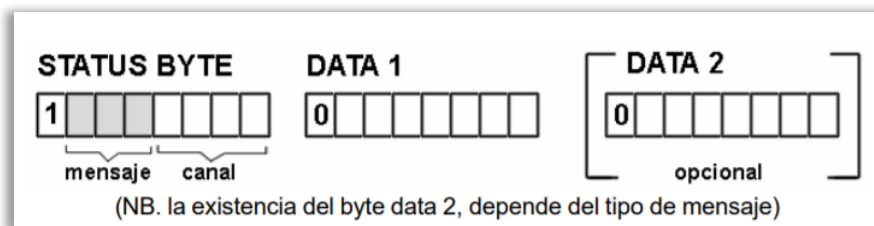


FIGURA 20: ESTRUCTURA BINARIA DE UN MENSAJE MIDI

Por lo tanto, existen 2^3 tipos de mensajes MIDI, ellos son:

- **Note On:** Le indica al dispositivo que debe iniciar una nota, en el primer byte de datos indica la altura de la nota, siendo 0 la nota más grave y 127 la nota más aguda, como se logra ver en la figura 18. En el segundo byte indica la velocidad del ataque, parámetro asociado con la intensidad sonora, algunos dispositivos no detectan este parámetro y envían una velocidad constante de 64.

- **Note Off:** Le indica al dispositivo que debe parar una nota. El primer byte consta de la altura de la nota y el segundo de la velocidad. La mayoría de equipos no responden a la velocidad de liberación, por ello es común que en su lugar se utilice el mensaje Note On con velocidad 0.
- **Polyphonic Aftertouch:** Consiste en la detección de los cambios de presión ejercidos al tocar una tecla, los teclados de alta gama son los que cuentan con esta opción. El primer byte indica la altura de la nota y el segundo byte la presión que se ejerce sobre ésta.
- **Control Change:** Se utiliza para seleccionar los controles de efectos del sonido, como la modulación, la reverberación, entre otros. El primer byte indica el tipo de control y el segundo indica el valor del control seleccionado.
- **Channel Aftertouch:** Es similar al Polyphonic Aftertouch, utiliza un único byte que envía un mensaje de presión por cada nota.
- **Pitch Bend:** Genera una variación de altura, usualmente se utiliza en teclados que contienen un control giratorio el cual se utiliza para crear un efecto de trémolo en el sonido. Utiliza los dos bytes de datos.
- **Program Change:** Se utiliza para seleccionar los distintos sonidos que contenga el sintetizador. Consta de un byte.
- **System Message:** Contienen información del sistema en general como la señal de tiempo para sincronización, información sobre secuencias de MIDI grabados anteriormente y detalles sobre la información de configuración del dispositivo en el que se trabaja.

Aunque un dispositivo contenga la interfaz MIDI, no es necesario que trabaje con todos los mensajes, esto depende de la capacidad de los dispositivos. La estructura genérica de cada mensaje se puede observar en la figura 21.

Nombre	Binario	Hex.	Data1	Data2
Note Off	1000 nnnn	8 N	altura	velocidad
Note On	1001 nnnn	9 N	altura	velocidad
Poly. Aftertouch	1010 nnnn	A N	altura	presión
Control Change	1011 nnnn	B N	tipo de control	intensidad
Chan. Aftertouch	1100 nnnn	C N	presión	
Pitch Bend	1101 nnnn	D N	MSByte	LSByte
Program Change	1110 nnnn	E N	programa	
System Message	1111 xxxx	F X		

FIGURA 21: MENSAJES MIDI

Cada nota musical y su frecuencia fundamental estandarizada tiene asignada un número específico en la notación MIDI (Figura 22).

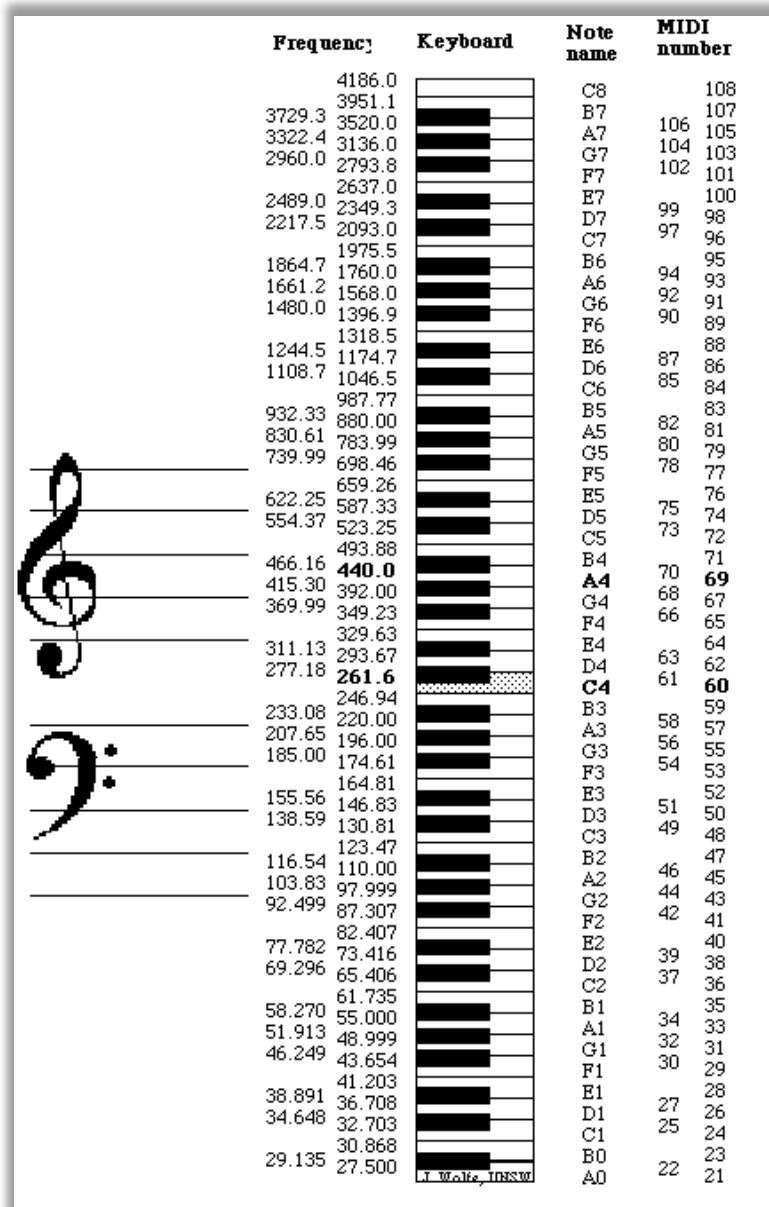


FIGURA 22: NOTACIÓN MIDI

5. Modelado de instrumentos mediante MATLAB

Con el fin de sintetizar instrumentos mediante la síntesis aditiva, es necesario realizar previamente el modelado de éstos. Tal como se ha explicado en el apartado 3, las características sonoras de los instrumentos se pueden obtener mediante el análisis de la señal en el espectro de frecuencias y en el dominio del tiempo.

Cada instrumento presenta unos componentes espectrales específicos, los cuales son posibles de obtener mediante el cálculo de la transformada de Fourier rápida (FFT) de datos extraídos a partir de un archivo de audio proveniente de grabaciones al tocar una sola nota del instrumento.

MATLAB es una herramienta fundamental para la realización de este proyecto ya que contiene funciones que permiten el análisis y la manipulación de señales de audio. Para obtener las componentes espectrales de cada instrumento se ha implementado una función llamada “*espectroFrecuencial*”, la cual realiza la FFT del audio y genera una gráfica del espectro de frecuencias, mediante esta gráfica es posible observar el valor de las amplitudes de cada armónico.

La función se ha implementado de la siguiente forma:

```
function espectroFrecuencial(audio)
%La función genera la gráfica del espectro frecuencial del audio de
entrada

[y,Fs] = audioread(audio); %Lee los datos muestreados y la
frecuencia de muestreo el audio
y=y/max(y); %Normaliza los datos
nMuestras=length(y); %Cantidad de muestras de los datos

%Transformada rápida de Fourier
senalEnFreq=abs(fft(y/(nMuestras/2))); %Genera la FFT de la señal,
normalizada según el muestreo
senalEnFreq1=senalEnFreq(1:nMuestras/2); %Reduce la señal a las
frecuencias audibles (elimina imagen espejo)
f=linspace(0,Fs/2,nMuestras/2); %Se crea el vector con los valores
de las frecuencias

plot(f,senalEnFreq1)
xlabel('Frecuencia [Hz]');
ylabel('Amplitud normalizada [V]');
title('Señal en el dominio de la frecuencia');

end
```

Al aplicar la función anterior y obtener los valores de la gráfica resultante se obtiene lo fundamental para recrear el sonido de un instrumento mediante el método de Fourier: la amplitud de cada armónico. Sin embargo, para obtener un sonido menos “digital” y más cerca a la naturalidad del instrumento, es conveniente estudiar la señal en el dominio del tiempo y así ajustar su envolvente a una envolvente ADSR (apartado 3.2).

Se debe tener en cuenta que cada instrumento tiene una envolvente característica, la cual no es exactamente la misma en todos los casos, ya que cuenta con algunas variaciones que dependen, por ejemplo, de la forma en la que éstos se toquen, por lo tanto, su generación también puede constar de valores subjetivos.

Para la obtención de la envolvente ADSR en el presente proyecto, primero se ha estudiado la señal de la nota de cada instrumento en el dominio del tiempo mediante la función “*senalDominioTiempo*”, la cual genera una gráfica con la señal en el dominio del tiempo. El código es el siguiente:

```
function senalDominioTiempo(audio)
%La función genera la gráfica en el dominio del tiempo del audio de
entrada

[y,Fs] = audioread(audio); %Lee los datos muestreados y la
frecuencia de muestreo el audio
y=y/max(y); %Normaliza los datos

plot(y)
```

```

xlabel('Tiempo [s]');
ylabel('Amplitud normalizada [V]');
title('Señal en el dominio del tiempo');
end

```

Como siguiente paso, se ha creado la función “*envADSR*”, la cual genera una envolvente ADSR mediante una expresión analítica. Los datos de entrada son la duración y la frecuencia de muestreo, para adaptarlo posteriormente a la síntesis aditiva, y lo que la define: el porcentaje de amplitud de sostenimiento y los tiempos de duración del ataque, decaimiento, sostenimiento y relajación. Dichos valores han sido elegidos de forma que la envolvente resulte similar a la envolvente de la señal original, visualizada mediante la gráfica en el dominio del tiempo.

La función “*envADSR*” se ha implementado de la siguiente forma:

```

function [envolvente] =
envADSR(duracion,Fs,pSostenimiento,dAtaqueS,dDecaimientoS,dSostenimie
entoS,dRelajacionS)
%envolventeADSR devuelve un vector "envolvente", la entrada
%será la frecuencia de muestreo, el porcentaje de amplitud del
sostenimiento y la duracion del ataque, decaimiento,
%sostenimiento y relajación (en segundos).

% Se normaliza la amplitud de sostenimiento
aSostenimiento = pSostenimiento/100;
% Se normalizan los segundos de duracion de cada etapa
dTotal = dAtaqueS+dDecaimientoS+dSostenimientoS+dRelajacionS;
dAtaqueS = (duracion*dAtaqueS)/dTotal;
dDecaimientoS = (duracion*dDecaimientoS)/dTotal;
dSostenimientoS = (duracion*dSostenimientoS)/dTotal;
dRelajacionS = (duracion*dRelajacionS)/dTotal;
% Se pasa cada duracion de Segundos a Muestras
dAtaqueM = round(dAtaqueS*Fs);
dDecaimientoM = round(dDecaimientoS*Fs);
dSostenimientoM = round(dSostenimientoS*Fs);
dRelajacionM = round(dRelajacionS*Fs);
dTotalM=dAtaqueM+dDecaimientoM+dSostenimientoM+dRelajacionM;

if dTotal~=Fs*duracion
    dRelajacionM=abs(dRelajacionM- (dTotalM- (Fs*duracion)));
else
    dRelajacionM=dRelajacionM;
end
% Se genera la envolvente aplicando la expresion analitica
% Primero se generan los componentes X e Y de cada etapa
tAtaque = [0:dAtaqueM]; %Componente X del ataque
ataque = ((1/dAtaqueM)*(tAtaque-dAtaqueM))+1; %Componente Y del
ataque
tDecaimiento = [0:dDecaimientoM-1]; %Componente X del decaimiento
decaimiento = (((aSostenimiento-1)/dDecaimientoM)*(tDecaimiento-
dDecaimientoM))+aSostenimiento; %Componente Y del decaimiento
tSostenimiento = ones(1,dSostenimientoM); %Componente X del
sostenimiento
sostenimiento = tSostenimiento*aSostenimiento; %Componente Y del
sostenimiento
tRelajacion = [0:dRelajacionM-1]; %Componente X de la relajación
relajacion = (-aSostenimiento/dRelajacionM)*(tRelajacion-
dRelajacionM); %Componente Y de la relajación

```

```

% Por último se concatena cada etapa para formar la envolvente
ADSR
envolvente=[ataque decaimiento sostenimiento relajacion];
end

```

A partir de las funciones descritas en este apartado se han modelado los instrumentos, los resultados y detalles de cada instrumento se presentan a continuación.

5.1 Instrumentos de cuerda

Los instrumentos de cuerda son los que producen sonidos mediante vibraciones de una o múltiples cuerdas, normalmente amplificadas a través de una caja de resonancia. Dichas cuerdas están tensadas entre dos extremos. A su vez, se dividen en tres tipos: de cuerda frotada, de cuerda pulsada y de cuerdas percutidas.

En el presente proyecto se estudiará la guitarra acústica y el banjo (cuerda pulsada), el violín (cuerda frotada) y el piano (cuerda percutida).

- **Guitarra:**

El espectro frecuencial resultante es el siguiente:

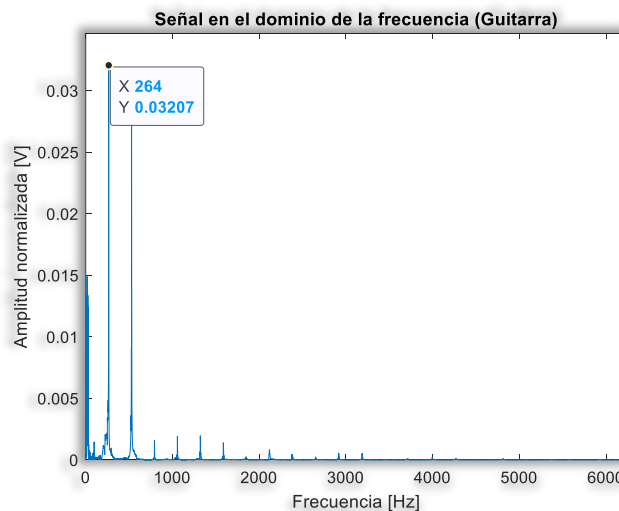


FIGURA 23: ESPECTRO FRECUENCIAL DE LA GUITARRA

Se ha estudiado el sonido de la guitarra acústica al tocar una cuerda con una púa, el envolvente ADSR que logra su imitación consiste en un ataque muy rápido, un decaimiento corto con una amplitud baja, y un sostenimiento y liberación con más duración que los anteriores, pero sin llegar a ser muy largos.

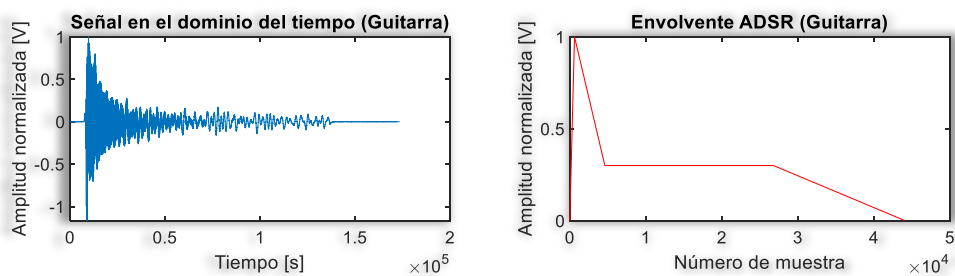


FIGURA 24: ENVOLVENTE DE LA GUITARRA

- **Banjo:**

El espectro frecuencial resultante del banjo es:

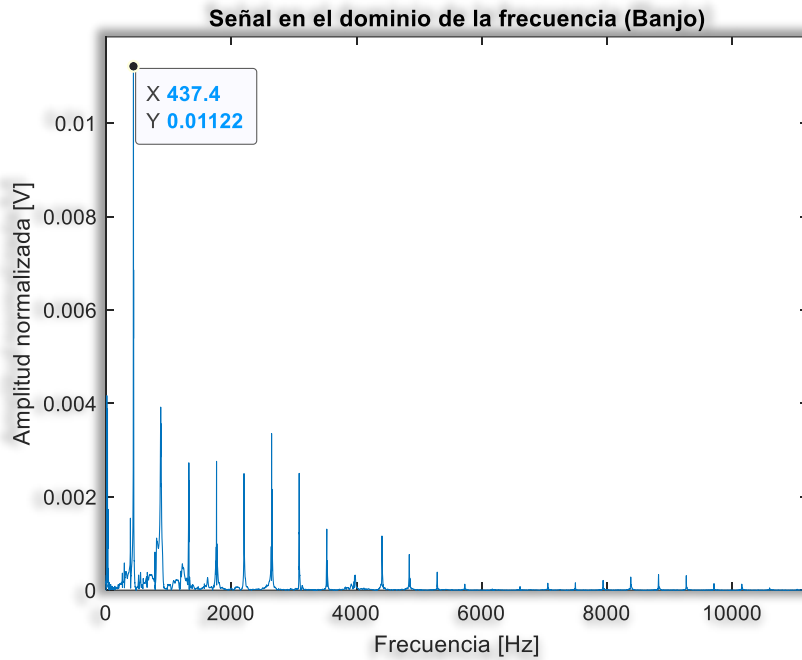


FIGURA 25: ESPECTRO FRECUENCIAL DEL BANJO

Respecto a la envolvente, aunque ambos instrumentos son de cuerda pulsada, el ataque del banjo es incluso más rápido que el de la guitarra, el decaimiento es más corto y con menos amplitud, el sostenimiento es corto y la liberación es más larga.

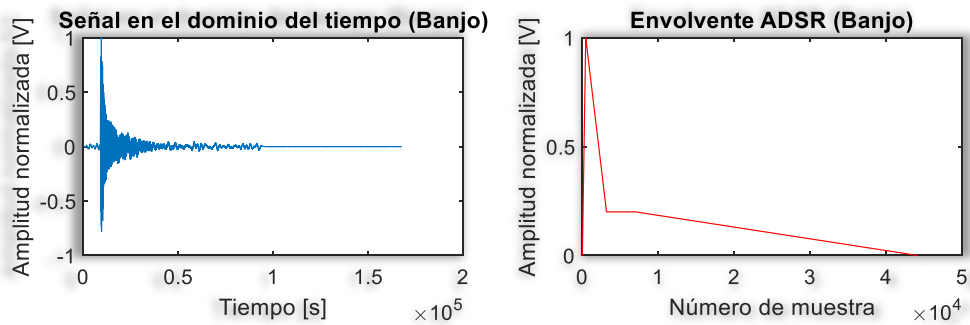


FIGURA 26: ENVOLVENTE DEL BANJO

- **Violín:**

El espectro frecuencial es el siguiente:

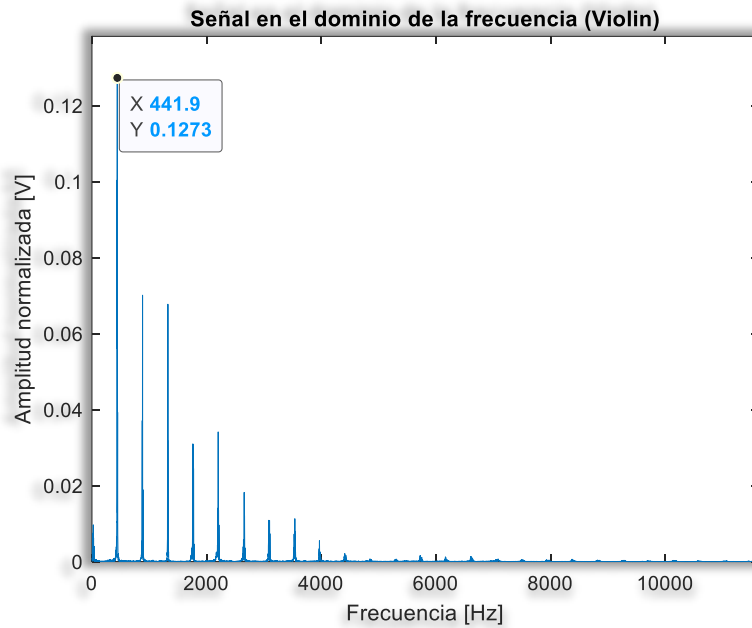


FIGURA 27: ESPECTRO FRECUENCIAL DEL VIOLÍN

La envolvente del violín se caracteriza por un ataque de duración normal y decaimiento nulo, un sostenimiento con amplitud máxima, y una liberación bastante larga.

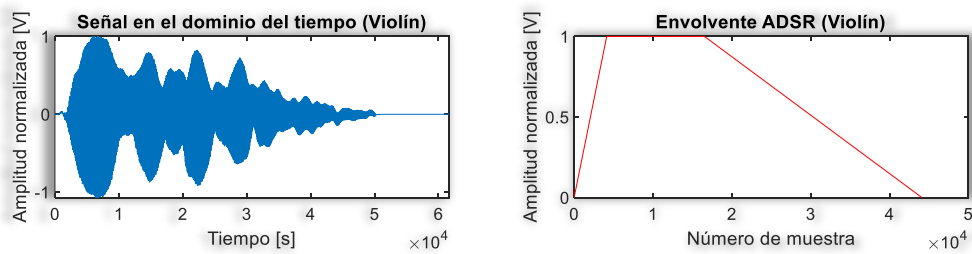


FIGURA 28: ENVOLVENTE DEL VIOLÍN

- **Piano:**

El espectro frecuencial resultante del piano se ve de la siguiente forma:

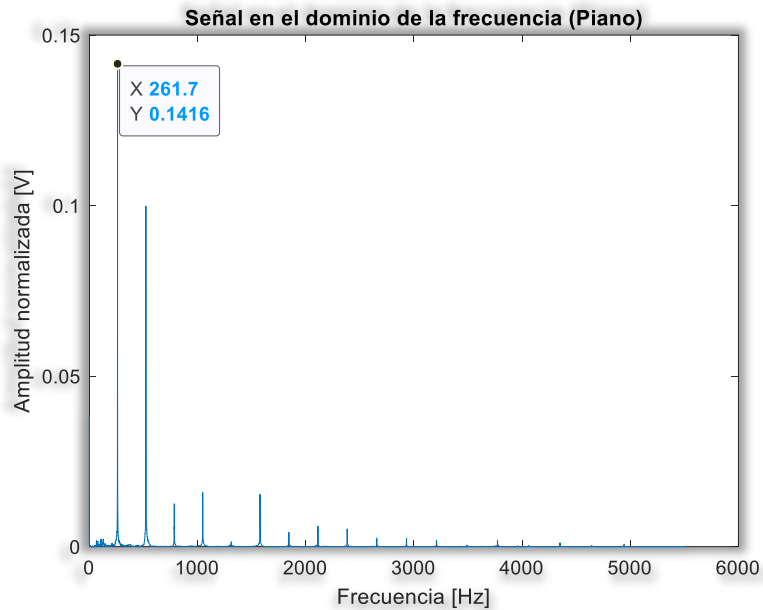


FIGURA 29: ESPECTRO FRECUENCIAL DEL PIANO

La envolvente del piano tiene una forma exponencial, en el proyecto se ha optado por modificar la envolvente ADSR de forma que genere un sonido más similar al piano electrónico, por ello se ha escogido un ataque y liberación rápida y un sostenimiento largo con amplitud máxima.

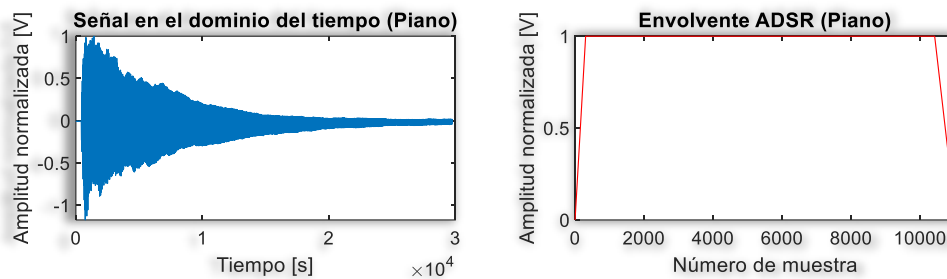


FIGURA 30: ENVOLVENTE DEL PIANO

Los valores obtenidos a partir de los espectros y los utilizados para la generación de la envolvente ADSR son los siguientes:

Armónicos	Guitarra	Banjo	Violín	Piano
f	0.03207	0.01122	0.1273	0.1416
2f	0.02928	0.00392	0.07009	0.09987
3f	0.01504	0.002727	0.06772	0.01254
4f	0.001873	0.002759	0.03075	0.01584
5f	0.001647	0.002496	0.03411	0.001425
6f	0.001336	0.003355	0.0182	0.01532
7f	0.0008313	0.002343	0.01086	0.002571
8f	0.0004061	0.001233	0.01081	0.005974
9f	0.0002245	0.0003229	0.003783	0.005192
10f	0.0002245	0.00116	0.002956	0.002478

	Tiempo de ataque	Tiempo de decaimiento	Tiempo de sostenimiento	Tiempo de liberación	Porcentaje de amplitud de sostenimiento
Guitarra	0.014	0.09	0.5	0.39	30
Banjo	0.01	0.062	0.087	0.84	20
Violín	0.09	0.22	0.063	0.625	100
Piano	0.025	0.025	0.8	0.05	100

5.2 Instrumentos de viento-madera

Los instrumentos de viento manera son aquellos que generan sonido mediante el uso del aire, el cual se genera en dentro del instrumento al soplarlo, y generalmente están fabricados con madera. La longitud del tubo es la que determina las notas que suenan. El sonido que producen se caracteriza por sonar de forma melodiosa y dulce.

En el proyecto se modelarán el oboe, la flauta y el clarinete. La envolvente ADSR característica de instrumentos de viento tienen forma de trapecoide, con pequeñas variaciones según el instrumento. Las gráficas de las componentes frecuenciales y las envolventes ADSR generadas son las siguientes:

- **Oboe:**

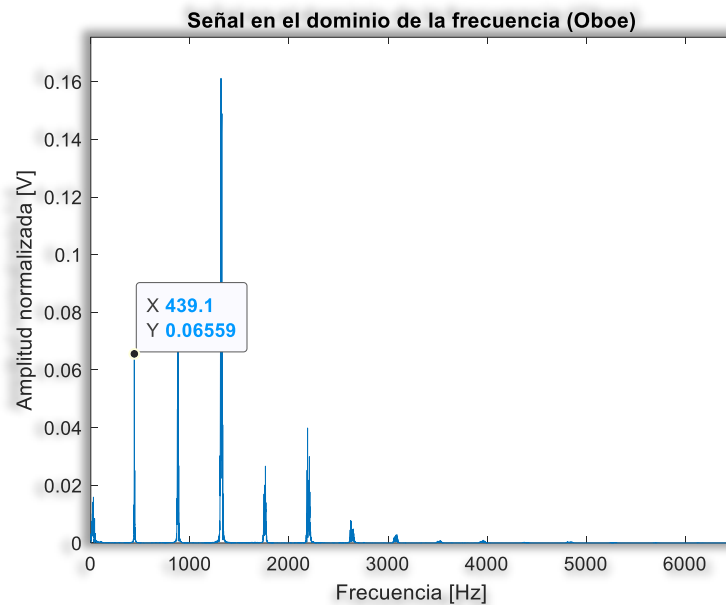


FIGURA 31: ESPECTRO FRECUENCIAL DEL OBOE

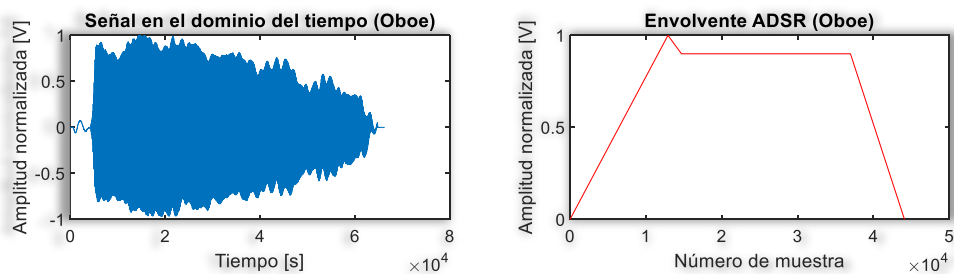


FIGURA 32: ENVOLVENTE DEL OBOE

- Flauta:

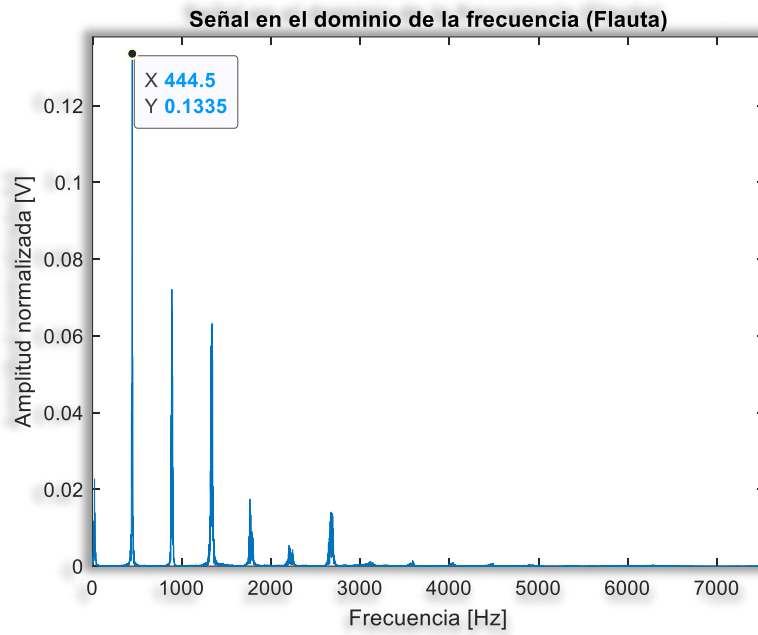


FIGURA 33: ESPECTRO FRECUENCIAL DE LA FLAUTA

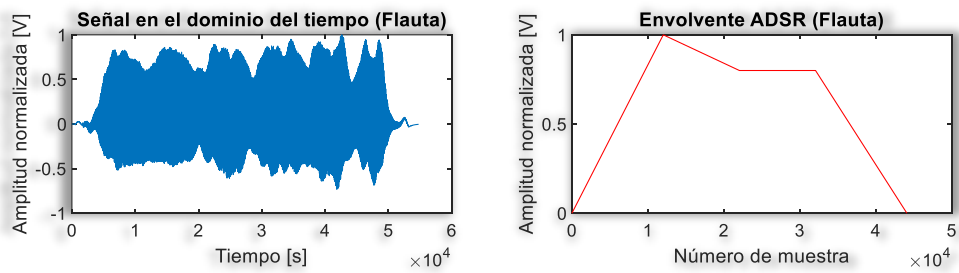


FIGURA 34: ENVOLVENTE DE LA FLAUTA

- Clarinete:

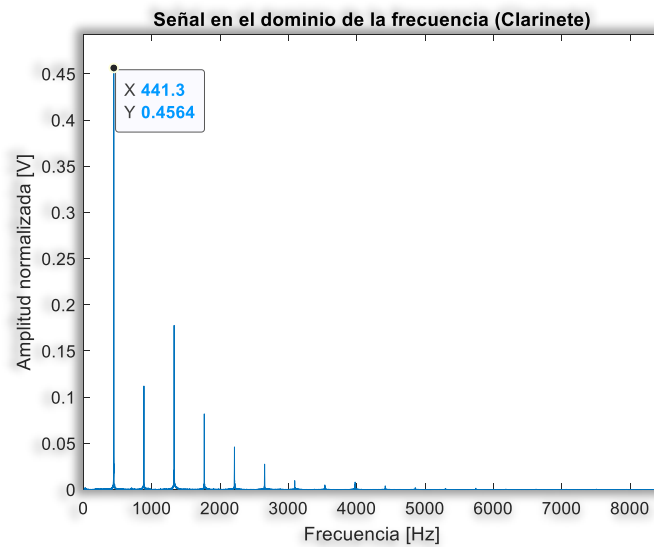


FIGURA 35: ESPECTRO FRECUENCIAL DEL CLARINETE

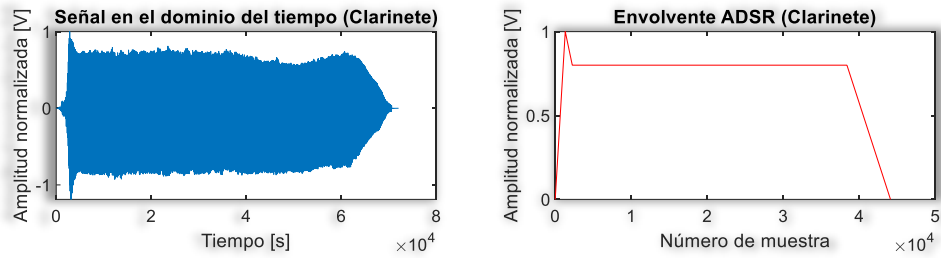


FIGURA 36: ENVOLVENTE DEL CLARINETE

Los valores obtenidos a partir de los espectros y los utilizados para la generación de la envolvente ADSR son los siguientes:

Armónicos	Oboe	Flauta	Clarinete
f	0.06559	0.01335	0.4564
2f	0.06568	0.07209	0.1121
3f	0.1797	0.06227	0.1777
4f	0.04523	0.01622	0.08187
5f	0.02655	0.00469	0.04608
6f	0.008484	0.0137	0.02748
7f	0.004929	0.001239	0.009626
8f	0.002103	0.001435	0.004976
9f	0.0009053	0.0006678	0.008025
10f	0.0008656	0.0006253	0.003953

	Tiempo de ataque	Tiempo de decaimiento	Tiempo de sostenimiento	Tiempo de liberación	Porcentaje de amplitud de sostenimiento
Oboe	0.29	0.04	0.5	0.16	90
Flauta	0.3	0.25	0.25	0.3	80
Clarinete	80	0.021	0.82	0.13	80

5.3 Instrumentos de viento-metal

Los instrumentos de viento-metal son instrumentos fabricados con un tubo de metal, una boquilla y una campana. Producen sonido mediante la vibración de los labios de la persona que lo toque a través de la boquilla, a través del aire. Al contrario que los instrumentos de viento-madera, éstos tienen un timbre brillante y potente.

La envolvente ADSR característica de cada instrumento tiene forma de trapecoide, de la misma forma que pasa con los instrumentos de viento-madera. En el proyecto se modelarán la trompeta, la tuba y el trombón. Las gráficas y los envolventes ADSR generados son los siguientes:

- **Trompeta**

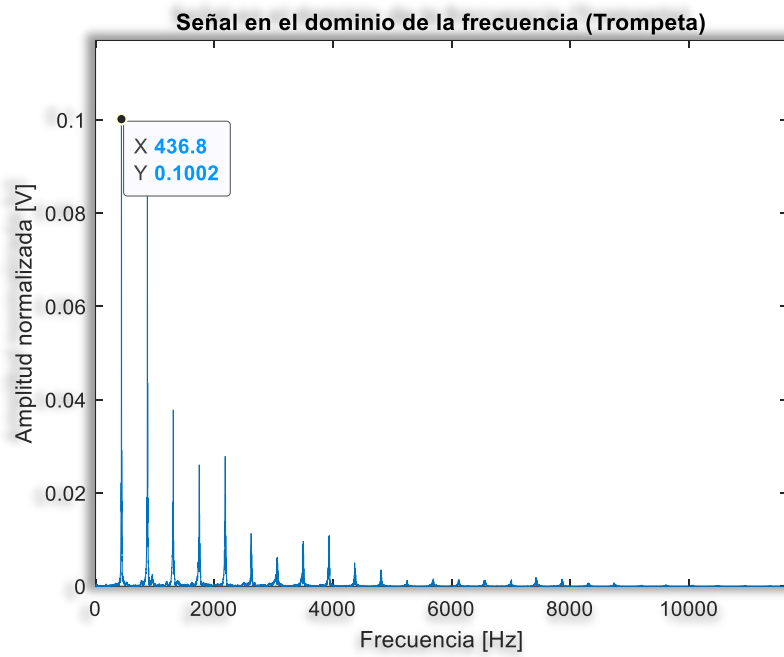


FIGURA 37: ESPECTRO FRECUENCIAL DE LA TROMPETA

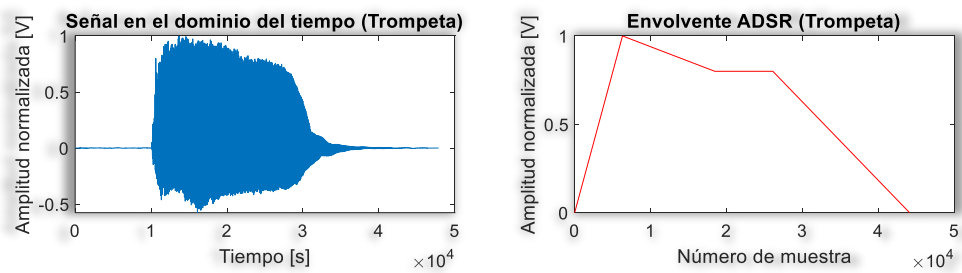


FIGURA 38: ENVOLVENTE DE LA TROMPETA

- Tuba:

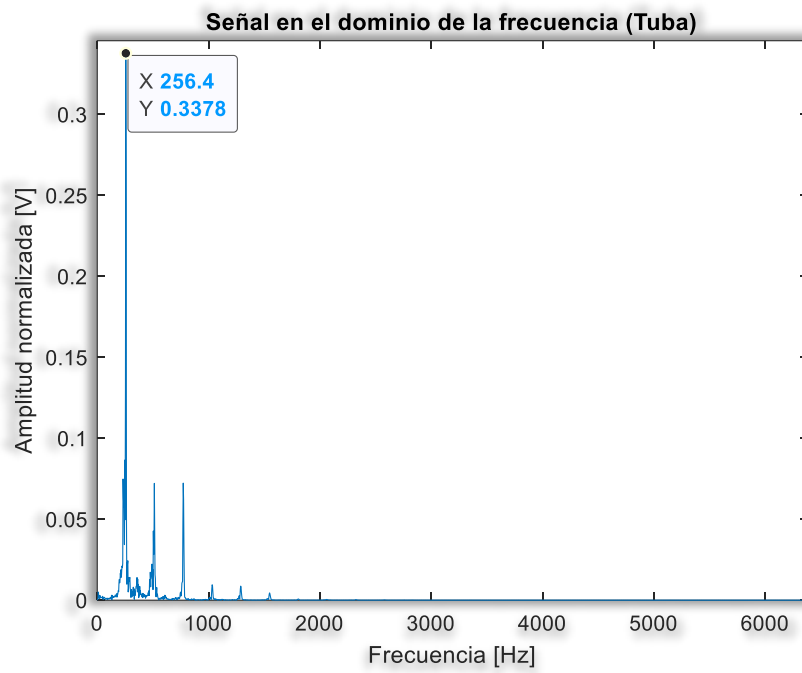


FIGURA 39: ESPECTRO FRECUENCIAL DE LA TUBA

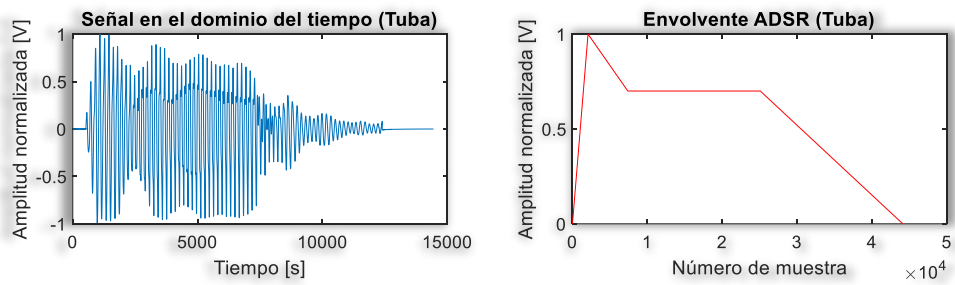


FIGURA 40: ENVOLVENTE DE LA TUBA

- **Trombón:**

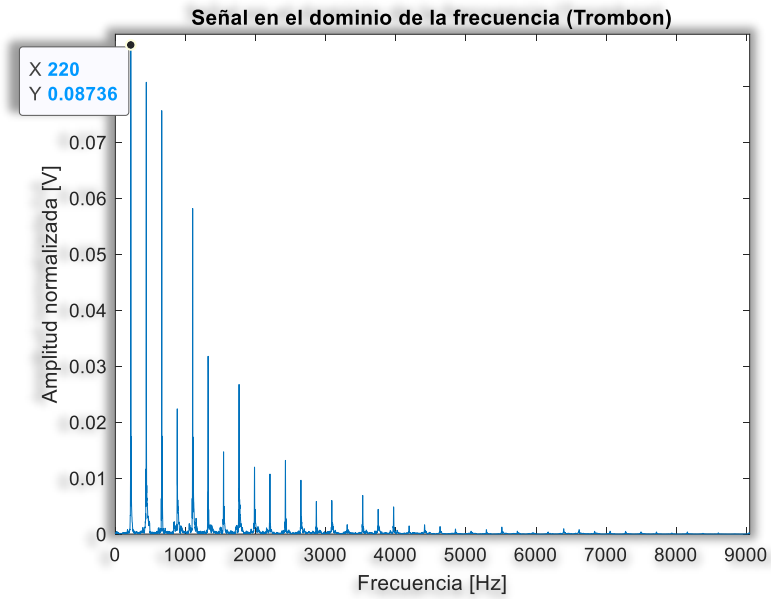


FIGURA 41: ESPECTRO FRECUENCIAL DEL TROMBÓN

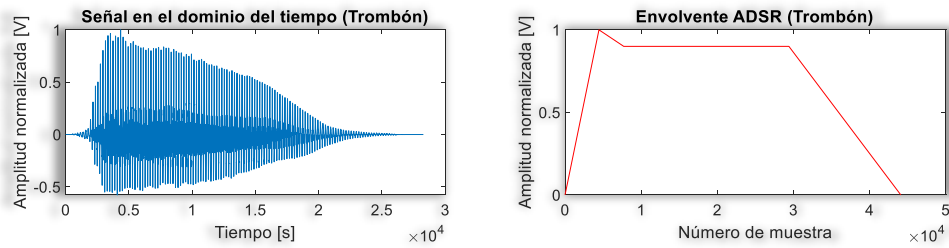


FIGURA 42: ENVOLVENTE DEL TROMBÓN

Los valores obtenidos a partir de los espectros y los utilizados para la generación de la envolvente ADSR son los siguientes:

Armónicos	Trompeta	Tuba	Trombón
f	0.1002	0.3378	0.07031
2f	0.09563	0.07217	0.148
3f	0.0370	0.07231	0.02347
4f	0.02601	0.009529	0.06058
5f	0.02786	0.0087	0.02869
6f	0.01131	0.003814	0.0336
7f	0.005406	-	0.01083
8f	0.008833	-	0.0148
9f	0.01085	-	0.01086
10f	0.004181	-	0.007741

	Tiempo de ataque	Tiempo de decaimiento	Tiempo de sostenimiento	Tiempo de liberación	Porcentaje de amplitud de sostenimiento
Trompeta	0.14	0.27	0.17	0.4	80
Tuba	0.047	0.12	0.4	0.43	70
Trombón	0.1	0.073	0.487	0.33	90

6. Síntesis aditiva mediante MATLAB

La construcción de la síntesis aditiva en el proyecto se ha realizado mediante la función *sintetizador* en MATLAB. La función produce como salida una variable “sonido” la cual contiene la señal sintetizada resultante, como entrada contiene tres elementos: *secuencia*, “*deltaT*” y “*Fs*”.

La *secuencia* consiste en una matriz de cuatro columnas y tantas filas como eventos se consideren en la síntesis, cada columna contiene el código MIDI correspondiente a las notas, la amplitud de las notas, la duración y el modelo de instrumento que se quiera sintetizar. *deltaT* consiste en el valor del desplazamiento temporal entre ventanas de síntesis y *Fs* es la frecuencia de muestreo.

La función por lo tanto tiene la siguiente forma:

```
function [sonido]=sintetizador(secuencia,deltaT,Fs)
```

Como ejemplo intuitivo, si se pretende escuchar la escala de DO mayor, se tendría que llamar a la función de la siguiente manera:

```
Fs=44100;
Nota_inicial=60;
Melodia=Nota_inicial+[0;2;4;5;7;9;11;12];
TiempoNota=0.5*ones(size(Melodia));
Amplitudes=ones(size(Melodia));
instrumento=0*ones(size(Melodia));
secuencia = [Melodia Amplitudes TiempoNota instrumento];
sonido=sintetizador(secuencia,0.5,Fs);
```

La altura de cada nota corresponde a su notación MIDI (Figura 22), en donde 60, 62, 64, 65, 67, 69, 71 y 72 corresponden a DO_5 , RE_5 , MI_5 , FA_5 , SOL_5 , LA_5 , SI_5 , DO_6 , respectivamente, existen tantos eventos como cantidad de notas, por lo tanto serían 8 eventos. El tiempo de cada nota es el mismo para cada una: 0.5, y la *deltaT* tiene un valor de 0.5, por lo tanto, cada nota tendría una duración de 0.25 segundos. La amplitud es la misma para todas las notas, por lo tanto, tiene el valor de 1. El modelo de instrumento variará según el número a ingresar, posteriormente se explicará el funcionamiento.

Como se ha explicado en el apartado 4.1.1, la síntesis aditiva parte del teorema de Fourier, en el cual una forma compleja de ondas se puede generar a partir de la suma de ondas sinusoidales simples y la expresión de una onda sinusoidal simple es la siguiente:

$$y = A \sin(2\pi ft) \quad (13)$$

Luego de modelar los instrumentos, conocemos lo fundamental: el valor de las amplitudes de cada armónico. Por lo tanto, la función contiene vectores con las amplitudes de cada instrumento y la cantidad de armónicos que poseen, como se observa a continuación:


```

% Modelo Oboe
modeloOboe.f=1:10;
modeloOboe.a=[0.06559 0.06568 0.1797 0.04523 0.02655 0.008484
0.004929 0.002103 0.0009053 0.0008656];

% Modelo Guitarra
modeloGuitarra.f=1:10;
modeloGuitarra.a=[0.03207 0.02928 0.01504 0.001873 0.001647
0.001336 0.0008313 0.0004061 0.0002245 0.0005213];

% Modelo Flauta
modeloFlauta.f=1:10;
modeloFlauta.a=[0.01335 0.07209 0.06227 0.01622 0.00469 0.0137
0.001239 0.001435 0.0006678 0.0006253];

% Modelo Piano
modeloPiano.f=1:10;
modeloPiano.a=[0.1416 0.09987 0.01254 0.01584 0.001425 0.01532
0.002571 0.005974 0.005192 0.002478];

% Modelo Violin
modeloViolin.f=1:10;
modeloViolin.a=[0.1273 0.07009 0.06772 0.03075 0.03411 0.0182
0.01086 0.01081 0.003783 0.002956];

% Modelo Trompeta
modeloTrompeta.f=1:10;
modeloTrompeta.a=[0.1002 0.09563 0.0370 0.02601 0.02786
0.01131 0.005406 0.008833 0.01085 0.004181];

% Modelo Banjo
modeloBanjo.f=1:10;
modeloBanjo.a=[0.01122 0.00392 0.002727 0.002759 0.002496
0.003355 0.002343 0.001233 0.0003229 0.00116];

% Modelo Clarinete
modeloClarinete.f=1:10;
modeloClarinete.a=[0.4564 0.1121 0.1777 0.08187 0.04608
0.02748 0.009626 0.004976 0.008025 0.003953];

% Modelo Tuba
modeloTuba.f=1:6;
modeloTuba.a=[0.3378 0.07217 0.07231 0.009529 0.0087
0.003814];111111111111

% Modelo Trombón
modeloTrombon.f=1:10;
modeloTrombon.a=[0.07031 0.148 0.02347 0.06058 0.02869 0.0336
0.01083 0.0148 0.01086 0.007741];

```

El sintetizador se inicializa definiendo el número de eventos según la cantidad de notas en la secuencia y se definen variables que se usarán posteriormente en el código:

```

%Inicializamos el sintetizador:
[NumEventos,~]=size(secuencia);
Ts=1/Fs;
sonido=0;
n=1;
fi0=zeros(100,1); % Vector con las fases iniciales de los parciales
(hasta un máximo de 100)
fil=fi0;
f_nota_anterior=zeros(100,1); % Vector con las frecuencias (hasta
un máximo de 100) de la nota en el evento anterior

```

Se inicia un bucle que recorre la cantidad de eventos de entrada y extrae los datos de ésta, el número de modelo de entrada varía según se observa en el *switch* del código: se presentan dos modelos para cada instrumento, uno con envolvente ADSR (con los valores obtenidos en el análisis (Apartado 5)) y otro sin ésta:

```

for evento=1:NumEventos
    % Leemos la nota
    NotaMidi=secuencia(evento,1);

    % Leemos el volumen
    Vol=secuencia(evento,2);

    % Leemos la duración y definimos el vector temporal
    dur=secuencia(evento,3);

    t=0:Ts:dur*deltaT;

    % Determinamos el modelo de síntesis
    modelo=secuencia(evento,4);
    switch modelo
        case 0 % Oboe sin envolvente ADSR
            motor_sintesis=modeloOboe;
            envolvente=Vol.*ones(1,round(deltaT*dur*Fs)+1);

        case 1 % Oboe con envolvente ADSR
            motor_sintesis=modeloOboe;
            envolventeADSR=envADSR(dur*deltaT, Fs, 90,0.29,0.04,0.5,0.16);
            envolvente=envolventeADSR*Vol;

        case 2 % Guitarra sin envolvente ADSR
            motor_sintesis=modeloGuitarra;
            envolvente=Vol*ones(1,round(deltaT*dur*Fs)+1);

        case 3 % Guitarra con envolvente ADSR
            motor_sintesis=modeloGuitarra;
            envolventeADSR=envADSR(dur*deltaT, Fs, 30,0.014,0.09,0.5,0.39);
            envolvente=envolventeADSR*Vol;

        case 4 % Flauta sin envolvente ADSR
            motor_sintesis=modeloFlauta;
            envolventeADSR=Vol*ones(1,round(deltaT*dur*Fs)+1);
            envolvente=envolventeADSR*Vol;

        case 5 % Flauta con envolvente ADSR
            motor_sintesis=modeloFlauta;
            envolventeADSR=envADSR(dur*deltaT, Fs, 80,0.3,0.25,0.25,0.3);
            envolvente=envolventeADSR*Vol;
    end
end

```

```

case 6 % Piano sin envolvente ADSR
    motor_sintesis=modeloPiano;
    envolventeADSR=Vol*ones(1,round(deltaT*dur*Fs)+1);
    envolvente=envolventeADSR*Vol;

case 7 % Piano con envolvente ADSR
    motor_sintesis=modeloPiano;
    envolventeADSR=envADSR(dur*deltaT, Fs, 100, 0.025
, 0.025, 0.8, 0.05);
    envolvente=envolventeADSR*Vol;

case 8 % Violin sin envolvente ADSR
    motor_sintesis=modeloViolin;
    envolventeADSR=Vol*ones(1,round(deltaT*dur*Fs)+1);
    envolvente=envolventeADSR*Vol;

case 9 % Violin con envolvente ADSR
    motor_sintesis=modeloViolin;
    envolventeADSR=envADSR(dur*deltaT, Fs, 100, 1.5, 3.5, 1, 10);
    envolvente=envolventeADSR*Vol;

case 10 % Trompeta sin envolvente ADSR
    motor_sintesis=modeloTrompeta;
    envolventeADSR=Vol*ones(1,round(deltaT*dur*Fs)+1);
    envolvente=envolventeADSR*Vol;

case 11 % Trompeta con envolvente ADSR
    motor_sintesis=modeloTrompeta;
    envolventeADSR=envADSR(dur*deltaT, Fs, 80, 0.14, 0.27, 0.17, 0.4);
    envolvente=envolventeADSR*Vol;

case 12 % Banjo sin envolvente ADSR
    motor_sintesis=modeloBanjo;
    envolventeADSR=Vol*ones(1,round(deltaT*dur*Fs)+1);
    envolvente=envolventeADSR*Vol;

case 13 % Banjo con envolvente ADSR
    motor_sintesis=modeloBanjo;
    envolventeADSR=envADSR(dur*deltaT, Fs, 20, 0.01
, 0.062, 0.087, 0.84);
    envolvente=envolventeADSR*Vol;

case 14 % Clarinete sin envolvente ADSR
    motor_sintesis=modeloClarinete;
    envolventeADSR=Vol*ones(1,round(deltaT*dur*Fs)+1);
    envolvente=envolventeADSR*Vol;

case 15 % Clarinete con envolvente ADSR
    motor_sintesis=modeloClarinete;
    envolventeADSR=envADSR(dur*deltaT, Fs, 80, 0.03, 0.021, 0.82, 0.13);
    envolvente=envolventeADSR*Vol;

case 16 % Tuba sin envolvente ADSR
    motor_sintesis=modeloTuba;
    envolventeADSR=Vol*ones(1,round(deltaT*dur*Fs)+1);
    envolvente=envolventeADSR*Vol;

case 17 % Tuba con envolvente ADSR
    motor_sintesis=modeloTuba;
    envolventeADSR=envADSR(dur*deltaT, Fs, 70, 0.047, 0.12, 0.4, 0.43);
    envolvente=envolventeADSR*Vol;

```

```

    case 18 % Trombon sin envolvente ADSR
        motor_sintesis=modeloTrombon;
        envolventeADSR=Vol*ones(1,round(deltaT*dur*Fs)+1);
        envolvente=envolventeADSR*Vol;

    case 19 % Trombon con envolvente ADSR
        motor_sintesis=modeloTrombon;
        envolventeADSR=envADSR(dur*deltaT, Fs, 90, 0.1, 0.073, 0.487, 0.33);
        envolvente=envolventeADSR*Vol;

end

```

Por último, se aplica la expresión más importante en la síntesis aditiva: el sumatorio de ondas simples. El bucle recorre cada nota, según el valor de la altura de esta se aplica la fórmula del temperamento igual (Apartado 2.3) y así se denomina el valor que le faltaba a la expresión de la onda sinusoidal simple (Expresión 13): la frecuencia fundamental correspondiente y sus armónicos en el sumatorio. En el sumatorio, también se debe hacer el ajuste a la fase de forma que no se genere desfase.

Una vez se genera el sumatorio de cada nota, los datos se guardan en el vector *sonidoTrama*, que fuera del bucle se guarda a su vez en una posición ordenada del vector final *sonido*, el cual contiene la síntesis de todas las notas y se puede reproducir como cualquier archivo de audio en MATLAB, por ejemplo, mediante la función *sound*.

```

% Extraemos el número de armónicos

NumNotas=length(motor_sintesis.f);

for nota=1:NumNotas

    f=motor_sintesis.f(nota)*27.5*2^((NotaMidi-21)/12);

    % Ajustamos la continuidad de fase
    fi1(nota)=2*pi*t(1)-1*((f_nota_anterior(nota)-
f)/Fs)+fi0(nota);
    f_nota_anterior(nota)=f;

    amplitud=motor_sintesis.a(nota).*envolvente;
    sonidoTrama=sonidoTrama+amplitud.*cos(2*pi*f*t+fi1(nota));
    TamTrama=length(sonidoTrama);

end

fi0(1:NumNotas)=fi1(1:NumNotas);

sonido(n:(TamTrama+n-1))=sonidoTrama;

n=n+TamTrama;

sonidoTrama=0;

end

end

```

7. Conclusiones

Como se ha observado tras la elaboración del presente proyecto, se han modelado distintos instrumentos y con los parámetros obtenidos se ha desarrollado una función en MATLAB capaz de reproducir melodías musicales con la técnica de síntesis aditiva, tal como se marcaba en los objetivos principales.

Los valores objetivos obtenidos del análisis de los instrumentos y la aplicación de estos en el desarrollo de la función de síntesis aditiva han dado los resultados esperados, marcados por los objetivos. Cabe destacar que en los modelos en los que se ha aplicado el uso de la envolvente ADSR, adquirida en el análisis temporal del audio, el sonido resultante es mucho más natural que en los modelos en los cuales solo se han aplicado los parámetros obtenidos a través del estudio del espectro frecuencial.

La función del sintetizador se ha hecho de forma en la que resulte de uso sencillo para el usuario, ya que tiene similitud con los valores que se utilizan en el interfaz MIDI. Sin embargo, el sintetizador podría ser más práctico si se propone un formato totalmente compatible al MIDI, lo cual sería posible de lograr en el futuro, ya que los valores de entrada de la función son los estandarizados.

Finalmente, se puede decir que el proyecto ha sido productivo, ya que los resultados han sido los esperados y la realización del mismo me ha permitido aplicar y ampliar los conocimientos adquiridos al cursar la carrera, en especial lo referente al tratamiento de las señales de audio, y la programación en la herramienta MATLAB. También ha sido útil a la hora de comprender la relación entre los parámetros físicos y matemáticos con la música, y lo fundamental que es la comprensión de ello a la hora de la creación de herramientas para producir sonidos a través de medios digitales.

8. Bibliografía

- [1] Luz López, A; (2013). *Representación del sonido mediante Series de Fourier Funciones de Variable Compleja*. Disponible en:<<http://lcr.uns.edu.ar/fvc/NotasDeAplicacion/FVC-Ana%20Luz%20Lopez.pdf>> [Último acceso: 05 de agosto de 2020]
- [2] De Candé, R; (2012): *Nuevo Diccionario de la Música*, Madrid, Ediciones Robinbook, s.l.
- [3] Musicaysonido.es; (2019). *Altura Musical*. Disponible en:<<https://musicaysonido.es/2019/04/25/altura-musical/>> [Último acceso: 10 de agosto de 2020]
- [4] Musicaysonido.es; (2019). *Timbre*. Disponible en:<<https://musicaysonido.es/2019/03/12/timbre/>> [Último acceso: 10 de agosto de 2020]
- [5] Alton Everest, F; (2001): *The Master Handbook of Acoustics*, Estados Unidos, Ediciones McGraw-Hill, Inc.
- [6] Ricardo, D & Bruno, M; (2010). *¿Por qué usamos 12 notas? De Pitágoras a Bach*. Universidad de Buenos Aires, Argentina.
- [7] Basso, G; (2001). *Análisis espectral. La transformada de Fourier en la música*, Argentina, Ediciones Al Margen.
- [8] Xavier, S; (2012). *Perspectivas actuales en la síntesis digital de sonidos musicales*. Universitat Pompeu Fabra, España.
- [9] Jordà Puig, S; (1997). *Audio digital y MIDI*, Madrid, Ediciones Anaya Multimedia.