



universidad
de león



**Escuela de Ingenierías
Industrial, Informática y Aeroespacial**

**GRADO EN INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA
INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA**

Trabajo de Fin de Grado

**ESTUDIO COMPARATIVO DE RESPUESTA FRECUENCIAL
ENTRE INSTRUMENTOS MUSICALES CLÁSICOS Y
ELÉCTRICOS**

**COMPARATIVE STUDY OF FREQUENCY RESPONSE
BETWEEN CLASSICAL AND ELECTRIC MUSIC
INSTRUMENTS**

Autor: Víctor Manuel de Prado Jimeno
Tutor: Carlos Fernández López
Cotutor: Natalia Prieto Fernández

(Julio, 2023)

<p>UNIVERSIDAD DE LEÓN</p> <p>Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y Aeroespacial</p> <p>GRADO EN INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA</p> <p>Trabajo de Fin de Grado</p>
ALUMNO: Víctor Manuel de Prado Jimeno
TUTOR: Carlos Fernández López
TÍTULO: Estudio comparativo de respuesta frecuencial entre instrumentos clásicos y eléctricos
TITLE: Comparative study of frequency response between classical and electric music instruments
CONVOCATORIA: Julio, 2023
<p>RESUMEN: El presente proyecto tiene como objetivo realizar un estudio comparativo de la respuesta frecuencial entre un violín acústico y uno eléctrico. La importancia de este estudio radica en comprender las diferencias en la calidad y características del sonido producido por cada tipo de instrumento, así como en explorar las posibles ventajas y desventajas de utilizar uno u otro en diferentes contextos musicales.</p> <p>La respuesta frecuencial se refiere a cómo un instrumento reproduce y amplifica diferentes frecuencias de sonido. En el caso de los violines, la respuesta frecuencial puede variar significativamente entre los modelos acústicos y eléctricos. Mientras que en los violines acústicos tradicionales dependen de la resonancia de su caja de resonancia para amplificar el sonido, los violines eléctricos utilizan pastillas magnéticas para capturar las vibraciones de las cuerdas y convertirlas en señales eléctricas.</p> <p>El oído humano desempeña un papel fundamental en este estudio. Nuestro sistema auditivo tiene la capacidad de percibir y distinguir diferentes frecuencias y matices de sonido.</p> <p>Además de analizar la respuesta frecuencial, este proyecto también aborda la influencia del sistema de compresión mp3, ampliamente utilizado en la industria musical. El formato mp3 permite reducir el tamaño de los archivos de audio al eliminar cierta información redundante o imperceptible para el oído humano.</p> <p>La ecualización también es un factor relevante en este estudio ya que permite ajustar las frecuencias de un instrumento para lograr el equilibrio tonal deseado. A través de la ecualización, es posible realzar o atenuar ciertas frecuencias para obtener un sonido más equilibrado o agradable. Los violines acústicos suelen tener una respuesta más rica y orgánica a lo largo de las frecuencias audibles. Por otro lado, los violines eléctricos tienen a tener una respuesta más controlada y precisa, gracias a la tecnología de hoy en día.</p>
<p>ABSTRACT: The present Project aims to conduct a comparative study of the frequency response between anacoustic violín and an electric violín. The importance of this study lies in understanding the differences in the quality and characteristics of the sound produced by each type of instrument, as well as exploring the posible advantages and</p>

<p>disadvantages of using one or the other in different musical contexts.</p> <p>The frequency response refers to how an instrument reproduces and amplifies different sound frequencies. In the case of the violins, the frequency response can vary significantly between acoustic and electric models. While traditional acoustic violins rely on the resonance of their soundbox to amplify the sound, electric violins use magnetic pickups to capture the vibrations of the strings and convert them into electrical signals.</p> <p>The human ear plays a fundamental role in this study. Our auditory system has the ability to perceive and distinguish different frequencies and nuances of sound.</p> <p>In addition to analyzing the frequency response, this project also addresses the influence of the widely used mp3 compression system in the music industry. The mp3 format allows for reducing the size of audio files by eliminating certain redundant or imperceptible information in the human ear.</p> <p>This field focuses on understanding the different sensitivity to various frequencies, masking and auditory coding in the brain.</p> <p>Equalization is also a relevant factor in this study as it allows for adjusting the frequencies of the instrument to achieve the desired tonal balance. Through equalization, it is possible to enhance or attenuate certain frequencies to obtain a more balanced or pleasant sound.</p> <p>Acoustic violins often have a richer and more organic response across the audible frequencies. On the other hand, electric violins tend to have a more controlled and precise response, thanks to today's technology.</p>	
<p>Palabras clave: electricidad, electrónica, frecuencia, respuesta en frecuencia, Fourier, armónicos, ondas, espectro de frecuencias, ecualización, síntesis</p>	
<p>Firma del alumno:</p>	<p>VºBº Tutor/es: Carlos Fernández López Natalia Prieto Fernández</p>

Resumen

El presente proyecto tiene como objetivo realizar un estudio comparativo de la respuesta frecuencial entre un violín acústico y uno eléctrico. La importancia de este estudio radica en comprender las diferencias en la calidad y características del sonido producido por cada tipo de instrumento, así como en explorar las posibles ventajas y desventajas de utilizar uno u otro en diferentes contextos musicales.

La respuesta frecuencial se refiere a cómo un instrumento reproduce y amplifica diferentes frecuencias de sonido. En el caso de los violines, la respuesta frecuencial puede variar significativamente entre los modelos acústicos y eléctricos. Mientras que en los violines acústicos tradicionales dependen de la resonancia de su caja de resonancia para amplificar el sonido, los violines eléctricos utilizan pastillas magnéticas para capturar las vibraciones de las cuerdas y convertirlas en señales eléctricas.

El oído humano desempeña un papel fundamental en este estudio. Nuestro sistema auditivo tiene la capacidad de percibir y distinguir diferentes frecuencias y matices de sonido. Al comparar la respuesta frecuencial, se busca determinar cómo estas diferencias son percibidas por el oído humano.

Además de analizar la respuesta frecuencial, este proyecto también aborda la influencia del sistema de compresión mp3, ampliamente utilizado en la industria musical. El formato mp3 permite reducir el tamaño de los archivos de audio al eliminar cierta información redundante o imperceptible para el oído humano. Este proceso de compresión se basa en la psico acústica, que es el estudio de cómo el oído humano percibe y procesa el sonido. Esta rama se centra en comprender la diferente sensibilidad a diferentes frecuencias, el enmascaramiento y la codificación auditiva en el cerebro.

La ecualización también es un factor relevante en este estudio ya que permite ajustar las frecuencias de un instrumento para lograr el equilibrio tonal deseado. A través de la ecualización, es posible realzar o atenuar ciertas frecuencias para obtener un sonido más equilibrado o agradable. Los violines acústicos suelen tener una respuesta más rica y orgánica a lo largo de las frecuencias audibles. En cambio, los violines eléctricos tienen a tener una respuesta más controlada y precisa. En resumen, este proyecto de estudio comparativo de respuesta frecuencial entre un violín acústico y uno eléctrico busca comparar y proporcionar información sobre las diferencias técnicas en su sonido.

Abstract

The present Project aims to conduct a comparative study of the frequency response between an acoustic violin and an electric violin. The importance of this study lies in understanding the differences in the quality and characteristics of the sound produced by each type of instrument, as well as exploring the possible advantages and disadvantages of using one or the other in different musical contexts.

The frequency response refers to how an instrument reproduces and amplifies different sound frequencies. In the case of the violins, the frequency response can vary significantly between acoustic and electric models. While traditional acoustic violins rely on the resonance of their soundbox to amplify the sound, electric violins use magnetic pickups to capture the vibrations of the strings and convert them into electrical signals.

The human ear plays a fundamental role in this study. Our auditory system has the ability to perceive and distinguish different frequencies and nuances of sound. By comparing the frequency response, we aim to determine how these differences are perceived by the human ear.

In addition to analyzing the frequency response, this project also addresses the influence of the widely used mp3 compression system in the music industry. The mp3 format allows for reducing the size of audio files by eliminating certain redundant or imperceptible information in the human ear. This compression process is based on psychoacoustics, which is the study of how the human ear perceives and processes sound. This field focuses on understanding the different sensitivity to various frequencies, masking and auditory coding in the brain.

Equalization is also a relevant factor in this study as it allows for adjusting the frequencies of the instrument to achieve the desired tonal balance. Through equalization, it is possible to enhance or attenuate certain frequencies to obtain a more balanced or pleasant sound.

Acoustic violins often have a richer and more organic response across the audible frequencies. On the other hand, electric violins tend to have a more controlled and precise response, thanks to today's technology.

Índice de contenidos

Resumen.....	4
Abstract	5
Índice de figuras	7
1. Introducción.....	8
2. Objetivos.....	11
3. Parámetros del sonido	13
4. El violín acústico	16
5. El violín eléctrico.....	18
5.1 EFECTO PIEZOELÉCTRICO	19
5.2 PRINCIPIO DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA	20
5.3 INSTRUMENTOS ACTIVOS Y PASIVOS	21
5.3.1 Impedancia.....	21
5.3.2 Pastillas pasivas	21
5.3.3 Pastillas activas.....	22
6. Tipos de cuerdas	23
6.1 CUERDAS DE TRIPA	23
6.2 CUERDAS SINTÉTICAS	23
6.3 CUERDAS METÁLICAS	23
7. Oído humano	24
7.1 ANATOMÍA Y FUNCIONAMIENTO	24
7.2 LA CÓCLEA.....	25
7.3 CURVA ISOFÓNICA.....	27
8. Estándar MPEG-1 y mp3.....	29
9. Transformada de Fourier.....	31
10. Análisis de audio.....	33
10.1 SEÑAL DE SALIDA.....	33
10.2 POLARIDAD DE LA SEÑAL	41
10.3 ESPECTRO DE AUDIO	43
10.4 CONCLUSIONES.....	52
11. Ecuación.....	54
12. Conclusiones	56
13. Bibliografía.....	58

Índice de figuras

Figura 4.1: Violín acústico Misidoro (Fuente: Víctor de Prado [2023]).....	16
Figura 5.1: Violín eléctrico Misidoro (Fuente: Víctor de Prado [2023])	18
Figura 5.2: Efecto piezoeléctrico directo e inverso (Fuente: The direct piezoelectric effect, de A. Stapleton [2017])	20
Figura 7.1: El oído transforma las ondas esféricas en planas (Fuente:Fisiología auditiva, de Elena Sánchez Terradillos [2009]).....	24
Figura 7.2: Organización tonotópica de la cóclea (Fuente: Funcionamiento de la cóclea, de Pablo Gil-Lozaga [28/05/2021])	26
Figura 10.1: Curva de respuesta del micrófono utilizado (Fuente: Hoja de características behringer C2 [2023]).....	34
Figura 10.2: Analizador de audio en Matlab (Fuente: Víctor de Prado [2023])	34
Figura 10.3: Forma de onda de la cuerda de sol (Fuente: Violín acústico)	36
Figura 10.4: Forma de onda de la cuerda de sol (Fuente: Violín eléctrico)	36
Figura 10.5: Forma de onda de la cuerda de re (Fuente: Violín acústico)	37
Figura 10.6: Forma de onda de la cuerda de re (Fuente: Violín eléctrico).....	37
Figura 10.7: Forma de onda de la cuerda de la (Fuente: Violín acústico).....	38
Figura 10.8: Forma de onda de la cuerda de la (Fuente: Violín eléctrico)	38
Figura 10.9: Forma de onda de la cuerda de mi (Fuente: Violín acústico).....	39
Figura 10.10: Forma de onda de la cuerda de mi (Fuente: Violín eléctrico).....	39
Figura 10.11: Forma de onda de una nota arco abajo (Fuente: Violín eléctrico)	42
Figura 10.12: Forma de onda de una nota arco arriba (Fuente: Violín eléctrico).....	42
Figura 10.13: Analizador de espectro de audio en Matlab (Fuente: Víctor de Prado [2023]).....	43
Figura 10.14: Espectro de frecuencias de la cuerda de sol (Fuente: Violín acústico)	46
Figura 10.15: Espectro de frecuencias de la cuerda de sol (Fuente: Violín eléctrico)	46
Figura 10.16: Espectro de frecuencias de la cuerda de re (Fuente: Violín acústico)	48
Figura 10.17: Espectro de frecuencias de la cuerda de re (Fuente: Violín eléctrico)	48
Figura 10.18: Espectro de frecuencias de la cuerda de La (Fuente: violín acústico)	49
Figura 10.19: Espectro de frecuencias de la cuerda de La (Fuente: violín eléctrico).....	50
Figura 10.20: Espectro de frecuencias de la cuerda de Mi (Fuente: violín acústico).....	51
Figura 10.21: Espectro de frecuencias de la cuerda de Mi (Fuente: eléctrico).....	51
Figura 11.1: Ecuación de agudos en Audacity (Fuente: Víctor de Prado [2023])	55
Figura 11.2: Ecuación de graves en Audacity (Fuente: Víctor de Prado [2023]).....	55

1. Introducción

La historia de la música recorre un largo camino a lo largo de los siglos. Desde el año 15.000 A.C hasta el día de hoy se han ido sucediendo instrumentos musicales cada vez más complejos y especializados, desde la **bramadera** (instrumento de madera o hueso atada por uno de los extremos a una cuerda para posteriormente darle vueltas como si se tratase de una honda), pasando por el violín y el piano, hasta los instrumentos eléctricos de hoy en día, más comúnmente conocidos como electrófonos.

Se reconoce el periodo de los siglos XVII-XIX como la **Edad Dorada** de la música, y especialmente el Barroco (1600-1750), con compositores como Johann Sebastian Bach, Antonio Vivaldi; Georg Friedrich Haendel, Domenico Scarlatti, etc. Esta época se caracterizó por rechazo a la cultura renacentista, la exageración de lo elegante y extravagante y una visión pesimista de la vida.[1]

Los instrumentos musicales más característicos de este periodo son: viola de gamba, clave, laúd y flauta, y aunque son muy diferentes a los instrumentos modernos, son considerados como los predecesores.

Para la clasificación de los instrumentos clásicos utilizaremos el sistema de **Sachs Hornbostel**. Este sistema creado en el año 1914 por los musicólogos alemanes Erich Moritz von Hornbostel y Curt Sachs categoriza los instrumentos de acuerdo con su forma de producir el sonido.[2]

1. **Idiófonos:** El sonido se origina por la vibración de su propio cuerpo: xilófono, maraca, triángulo.
2. **Aerófonos:** Producen su sonido mediante la vibración del aire cuando pasa por su cuerpo: flauta, saxofón, trompeta.
3. **Membranófonos:** Estos instrumentos producen sonidos al vibrar una membrana tensa: timbal, tambor.
4. **Cordófonos:** El sonido se origina al vibrar una cuerda tensa. Violín, guitarra, piano, violonchelo
5. **Electrófonos:** Producen sonido mediante la electricidad. Sintetizador,

theremín, bajo eléctrico, violín eléctrico[3]

Podemos observar que la anterior clasificación se centra en la forma física de la producción del sonido. No distingue las conocidas y tradicionales “familia de cuerda, viento, percusión, etc.” Mediante esta clasificación podemos ser mucho más técnicos y prácticos a la hora de analizar el sonido entre los diferentes instrumentos musicales.

En este proyecto, se analizarán de forma técnica la característica frecuencial de dos instrumentos diferentes, el violín acústico clásico, utilizado desde el S.XVI, en contraposición con el violín eléctrico.

El estudio frecuencial entre un violín acústico y uno eléctrico es de gran relevancia en el campo de la electrónica musical, ya que nos permite explorar las características y diferentes técnicas entre estos dos instrumentos y es de vital importancia para aprovechar al máximo su potencial.

El violín acústico, se basa en las vibraciones de las cuerdas y en el funcionamiento de su caja de resonancia natural. Esta caja, construida principalmente de madera es la responsable de amplificar la pequeña vibración proveniente de las cuerdas.

Por otra parte, el violín eléctrico utiliza la tecnología de la electrónica para amplificar las vibraciones de las cuerdas. Estas señales eléctricas pueden ser modificadas a través de un sistema de amplificación y procesamiento. A diferencia del violín eléctrico, el violín acústico ofrece un mayor control sobre el volumen y la manipulación del audio. Esto se puede lograr mediante la utilización de ecualizadores, pedales de efectos y otros dispositivos electrónicos que permiten ajustar y modelar el timbre según las preferencias del intérprete.

La respuesta frecuencial de un violín eléctrico puede variar dependiendo del diseño de las pastillas o sensores utilizados. Algunos violines utilizan pastillas piezoeléctricas, que capturan las vibraciones mecánicas de las cuerdas y generan señales eléctricas proporcionales. Otros violines eléctricos utilizan pastillas magnéticas, que capturan las vibraciones magnéticas y también generan señales eléctricas. Como cada violín, cada tipo de pastilla es diferente y con sus características propias de sensibilidad y respuesta frecuencial.

Además de las diferencias de respuesta frecuencial, los violines eléctricos ofrecen una serie de ventajas en términos de conectividad y flexibilidad. Al tener salidas de audio, se pueden conectar directamente a sistemas de sonido, grabadoras, dispositivos de efectos y

amplificadores, lo que facilita su integración en grabaciones, producciones y presentaciones en vivo.

En conclusión, el estudio frecuencial de la respuesta frecuencial entre un violín acústico y uno eléctrico es esencial para comprender las diferencias técnicas y acústicas entre estos dos instrumentos. La clasificación tradicional se centra en categorías de cuerda, viento, percusión, etc., pero mediante un enfoque más técnico como el análisis de la respuesta frecuencial, podemos obtener una comprensión más detallada y práctica del sonido entre diferentes instrumentos.

2. Objetivos

El objetivo de estudio de este proyecto será el estudio y análisis de la respuesta frecuencial entre dos instrumentos musicales muy utilizados hoy en día, el violín acústico y el violín eléctrico. Aunque ambos instrumentos son capaces de producir las mismas notas o frecuencias, presentan diferencias en cuanto al sonido percibido por el oído humano. Por lo tanto, en este estudio se investigará el audio producido por cada instrumento, prestando especialmente atención a su forma de onda y al espectro de audio.

Los principales objetivos para conseguir en este proyecto son los siguientes:

- 1) Comprender el funcionamiento del violín acústico.
 - a. Estudio de su estructura: Se examinarán la influencia e importancia de las diferentes partes que componen un violín acústico.
 - b. Estudio de la física del sonido del violín acústico: Se investigarán los principios físicos relacionados con la vibración de las cuerdas, la transferencia de energía al cuerpo del violín y la resonancia experimentada en la caja de resonancia. Se analizarán como estos efectos físicos influyen en la generación del sonido característico del violín.
- 2) Comprender el funcionamiento del violín eléctrico.
 - a. Estudio de su estructura: Se examinarán la influencia e importancia de las diferentes partes que componen un violín eléctrico.
 - b. Estudio de la física del violín eléctrico: Se investigarán los principios físicos relacionados con la vibración de las cuerdas, y la recepción de su vibración y envío de la señal a través del sistema electrónico correspondiente, para su posterior amplificación. Se analizará como estos efectos influyen en la generación del sonido característico de un violín eléctrico.
- 3) Comprender el funcionamiento del oído.
 - a. Estudiar la anatomía del oído: Se debe adquirir un cierto conocimiento detallado sobre las diferentes partes que componen el oído, tanto externas como internas.
 - b. Investigar el proceso de audición
 - c. Entender el proceso de compresión mp3 y su relación con la cóclea.

- 4) Análisis y comparación de la señal de salida entre los dos instrumentos.
 - a. Mediante un analizador de audio, específicamente el analizador de señal hp (modelo 3561A) se obtendrán una serie de resultados en forma de onda, de la señal de salida tanto del violín acústico como del eléctrico. Una vez capturadas estas formas de onda y su espectro de frecuencias, se procederá a compararlos visualmente utilizando las herramientas de análisis del analizador de señal. Se podrán observar diferencias en su forma, amplitud y características frecuenciales propias de esta serie de instrumentos.
 - b. De la misma forma, pero utilizando la herramienta Matlab se desarrollará un programa que nos permita visualizar estas formas de onda y espectros de audio en tiempo real, tanto para el violín acústico como el violín eléctrico. Para ello haremos uso de la función “audiorecorder”, que podrá recoger los datos enviados por la tarjeta de sonido, conectada directamente al PC. Se representará en gráficas actualizadas en tiempo real el valor de estas señales, así como su espectro de audio.
- 5) Ecuilibración del violín eléctrico.
 - a. Haciendo uso del software “Audacity” y conociendo los resultados obtenidos anteriormente, se explorarán diferentes configuraciones, de manera que el intérprete pueda elegir aquellas que más se acercan al objetivo de sonido que se quiera.

3. Parámetros del sonido

Podemos definir el sonido como la propagación de ondas mecánicas originadas por la vibración de un cuerpo a través de un fluido o medio elástico. Se caracteriza por poseer tres parámetros acústicos esenciales: **amplitud, tiempo y frecuencia.**

- **Amplitud:** Es la variación máxima de la presión acústica en una onda sonora. Es decir, la intensidad con la que oímos un sonido. Se mide en decibelios (dB).
- **Tiempo:** Se refiere a la duración de una onda sonora.
- **Frecuencia:** Es una característica fundamental de una onda, que se define como la cantidad de ciclos completos que la onda realiza en un segundo. La frecuencia se mide en unidades de Hertz (Hz) y está estrechamente relacionada con la altura del sonido, como se utiliza en la música. En términos generales, cuanto mayor sea la frecuencia de una onda sonora, más agudo será el sonido que produce. Por otro lado, si la frecuencia es más baja, el sonido será más grave.

Dependiendo de su frecuencia podrán ser audibles para el oído humano, capaz de diferenciar un rango de frecuencias comprendidas entre 20-20KHz.

Las cuatro cuerdas del violín se corresponden con cuatro notas, con sus correspondientes frecuencias: **SOL** (196Hz), **RE** (293,7Hz), **LA** (440Hz) y **MI** (659,3Hz). Esto permite que a la hora de la práctica se puedan tocar un rango de frecuencias útiles comprendidas entre **196-2500 Hz.**

En la figura mostrada podemos ver un claro ejemplo de una onda simple cualquiera. Está representada la variación de la señal en función del tiempo y los parámetros descritos anteriormente también son visibles.

La expresión matemática que define una onda simple cualquiera es la siguiente:

$$f(x) = A * \text{sen}(\omega t + \varphi)$$

Donde:

- A = Amplitud
- ω = Velocidad angular
- φ = Desfase

Esta onda simple es perfectamente senoidal, es constante y no varía a lo largo del tiempo.

Sin embargo, no podría ser más diferente que una onda real producida en la realidad por un sonido cualquiera. La siguiente figura nos representa una onda compuesta con una frecuencia de valor 100Hz, pero con una forma poco parecida a una senoide. Esto se debe a los armónicos con la que se conforma.

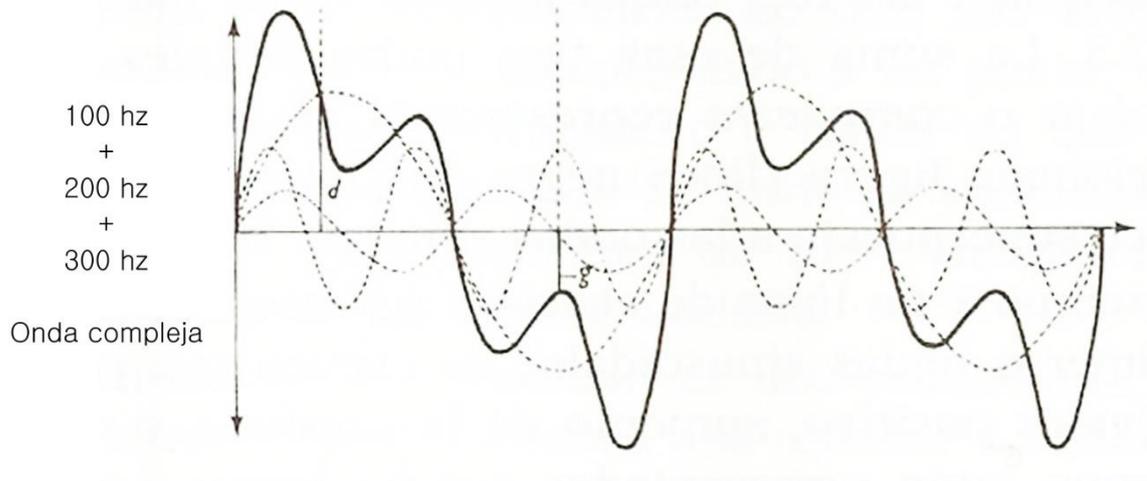


Figura 3.1: Onda compuesta (Fuente: [4])

Definiremos los armónicos como una señal que se produce a una frecuencia múltiple de la frecuencia fundamental. Es decir, cuando una de frecuencia fundamental se propaga a través de un medio cualquiera, se generan ondas secundarias con un valor de frecuencia múltiple entero de la frecuencia fundamental. Por ejemplo, si un violín produce la nota LA, que tiene 440Hz, los armónicos producidos secundarios, terciarios y cuaternarios serán sus múltiplos 880, 1320 y 1760 Hz, que también serán la misma nota LA, pero mucho más agudo.

Esto nos lleva a plantearnos una cuestión fundamental: “¿Cuál es la diferencia entre dos notas iguales pero creadas con un instrumento diferente?”, o lo que es lo mismo, “¿Cuál es la diferencia entre dos ondas con el mismo valor de frecuencia, pero creadas por diferentes cuerpos con diferentes características físicas, mecánicas y sonoras?”

Es en este momento, cuando recurriremos a el fenómeno físico que nos explica esta importante cuestión: la resonancia.

La resonancia es un fenómeno físico que ocurre cuando un objeto es excitado por un agente externo que vibra a una cierta frecuencia. A esta vibración se le denomina frecuencia de resonancia y ocasiona que este cuerpo que originalmente estaba en reposo vibre con una amplitud máxima. Esta energía se acumula en el cuerpo y las oscilaciones

suelen durar más tiempo que a otras frecuencias cualesquiera.

La frecuencia natural o fundamental de un objeto es la frecuencia a la que oscila cuando no hay ninguna fuerza externa aplicada, es decir, cuando oscila libremente. Esto supone que no haya transferencia de energía entre el entorno y el objeto.

Las aplicaciones de este fenómeno han sido utilizadas en medicina, mediante las resonancias magnéticas, que permiten crear imágenes para observar órganos, huesos y tejidos en el cuerpo humano para posteriormente diagnosticar variedad de afecciones, desde desgarros hasta rupturas. También fue la responsable del colapso del famoso “Puente de Tacoma”, que colapsó por la acción del efecto del viento que crea unas corrientes de aire cuya frecuencia coincidían con la frecuencia natural del puente.

Finalmente, podemos aplicar el fenómeno de la resonancia a la física, la ingeniería y la música. No solo influye en el instrumento que estamos tocando, afecta también al entorno donde nos encontramos. Es por eso, que es habitual que determinados muebles y objetos, generalmente contruidos de madera o cristal, sufran de este fenómeno cuando se generan ondas coincidentes con la frecuencia natural.

4. El violín acústico

El violín es considerado como uno de los instrumentos más versátiles y expresivos de la música clásica y popular. Tiene una larga historia que se remonta al siglo XVI en Italia, donde fue desarrollado y perfeccionado por luthieres como Stradivari y Amati.

A lo largo de la historia de la música, el violín acústico ha sido un componente central en numerosos estilos y géneros musicales, desde la música clásica y música de cámara hasta el folk, el jazz y la música popular. Su rango tonal, versatilidad y capacidad expresiva lo convierten en un instrumento ampliamente utilizado y apreciado.



Figura 4.1: Violín acústico Misidoro (Fuente: elaboración propia)

El violín es un instrumento de cuerda construido principalmente de madera. Está compuesto por dos partes principales: la tapa superior (visible en la foto) y la tapa posterior, unidas por los costados. Dentro del cuerpo se encuentra el alma, una pequeña pieza de madera que sostiene la presión de las cuerdas y ayuda a transmitir las vibraciones entre las dos tapas. La caja de resonancia es el espacio creado donde dichas vibraciones se amplifican.[5]

El procedimiento y funcionamiento del violín se basa en principios de acústica y vibraciones en las cuerdas. Cuando estas se frotran o se pellizcan, se generan unas vibraciones que se transmiten a la caja de resonancia a través del puente. La caja de resonancia actúa como un amplificador natural. Los diferentes componentes del violín, como el alma, influyen en la calidad y el equilibrio del instrumento. El recorrido que hace

el sonido en un violín acústico es el siguiente:

- 1) Se hacen vibrar las cuerdas pellizcándolas o pasando el arco a través.
- 2) Las ondas generadas recorren las cuerdas hasta llegar hasta el puente, lo atraviesan y llegan al cuerpo del violín.
- 3) Una vez llegan a la tapa, y atravesando el alma, recorren todo el conjunto de la caja de resonancia de forma uniforme.
- 4) Finalmente, esa pequeña vibración generada por las cuerdas se amplifica en la caja y sale exterior por las dos “efes”.

Observando el recorrido de las vibraciones a través del violín podemos desarrollar una serie de conclusiones que afectan de forma directa al sonido de dicho instrumento:

- Sin una caja de resonancia, el instrumento apenas suena. El sonido necesita amplificarse.
- El alma, una pequeña columna de madera que une las dos tapas del violín es de vital importancia, ya que resiste la presión ejercida por las cuerdas y permite que la vibración viaje a través de ella.
- Una avería tanto en la caja de resonancia como en el alma sería de forma inmediata fatal para la producción del sonido.
- El puente es un componente crucial, transmite las vibraciones de las cuerdas a la tapa del violín y garantiza la correcta distribución de la energía sonora.
- La calidad de la madera utilizada en la construcción del violín influye considerablemente en su sonido y frecuencia.
- La forma y tamaño del cuerpo del violín también tienen un impacto en su proyección de sonido y características tonales.

En resumen, el violín acústico es un instrumento de gran relevancia en la música debido a su versatilidad y capacidad expresiva. Su construcción y funcionamiento se basan en principios de acústica y vibraciones, donde la caja de resonancia, el alma y el puente desempeñan un papel muy importante en la producción del sonido característico del violín. Además, la calidad del material y las habilidades del intérprete influyen notablemente en el resultado final.

5. El violín eléctrico

El violín eléctrico nació en la década de 1920, cuando Stuff Smith, un violinista de jazz poco reconocido, decidió utilizar unos amplificadores junto a su violín acústico. Aunque no triunfó en un principio debido a escasa electrónica del momento, sería el precedente para los años venideros.

Entre los años 1930 y 1940, algunas marcas empezaron a comercializar este instrumento, pero su popularidad se mantuvo muy baja y no existía tanta variedad de instrumentos. Finalmente, a partir de 1990 con el auge y gran desarrollo de la electrónica, se apreció un gran cambio e interés en este instrumento. Fue entonces, cuando el violín eléctrico empezó a comercializarse masivamente, surgieron grandes variedades de marcas y diferentes modelos de violines.[6]



Figura 5.1: Violín eléctrico Misidoro (Fuente: elaboración propia)

El principio físico del funcionamiento del violín eléctrico es diferente frente al de un violín acústico. Este último utiliza la geometría y aerodinámica de su caja de resonancia para que sólo con una pequeña fricción de las cuerdas, el sonido se vea amplificado en gran medida. El violín eléctrico, en cambio, necesita de un equipo eléctrico que transmita su señal de salida y la amplifique para que sea escuchada adecuadamente.

Para transmitir la señal de salida se utilizan pastillas, que serán las encargadas de convertir las vibraciones de las cuerdas en señales eléctricas. Estas pastillas capturan las vibraciones

de las cuerdas y las transforman en corrientes eléctricas proporcionales en función de la intensidad de las vibraciones.

Existen 2 tipos de pastilla: las pastillas piezoeléctricas y las pastillas magnéticas. Las pastillas piezoeléctricas utilizan materiales piezoeléctricos para convertir las vibraciones mecánicas de las cuerdas en señales eléctricas y se colocan en contacto directo con las cuerdas. Son conocidas por ofrecer un sonido con cualidades de claridad, definición y buena precisión en cuanto a captura de señales se refiere. Las pastillas magnéticas en cambio utilizan bobinas e imanes para convertir las vibraciones en señales eléctricas. Se colocan debajo del puente y utilizan la interacción entre los imanes y el movimiento de las cuerdas para generar corrientes eléctricas en las bobinas.

La elección entre pastillas piezoeléctricas o magnéticas depende del estilo de música y sonido buscado por el intérprete.

5.1 EFECTO PIEZOELÉCTRICO

El efecto piezoeléctrico es un fenómeno que se produce en determinados sólidos para generar una carga eléctrica mediante una tensión mecánica. Es reversible, es decir, transforma esta tensión en electricidad y viceversa. Fue descubierto por los hermanos Jacques y Pierre Curie en 1880 y se encuentra en materiales como el cuarzo.

En un material piezoeléctrico como el cuarzo, los átomos están dispuestos en una estructura cristalina de forma simétrica. Dentro de esta estructura, los átomos están unidos por enlaces químicos (iónicos, covalentes y metálicos) y los electrones se distribuyen de forma equilibrada alrededor de los núcleos atómicos.

Cuando se aplica una presión o fuerza mecánica sobre la superficie de estos materiales, esta afecta a su estructura cristalina y provoca un desplazamiento de los iones positivos y negativos. Se produce entonces una deformación diferente a la simetría original y crea una distribución asimétrica en las cargas eléctricas del material. Esta asimetría es la causante de que se produzca un campo eléctrico interno en el material que, siendo proporcional a la fuerza suministrada originalmente, provocará una diferencia de potencial eléctrico en las cargas del material.

El efecto piezoeléctrico es reversible, de forma que cuando se aplica un campo eléctrico sobre el material dado, las cargas eléctricas generaran una asimetría en la estructura

cristalina y, por ende, se provocará una expansión o contracción del material.

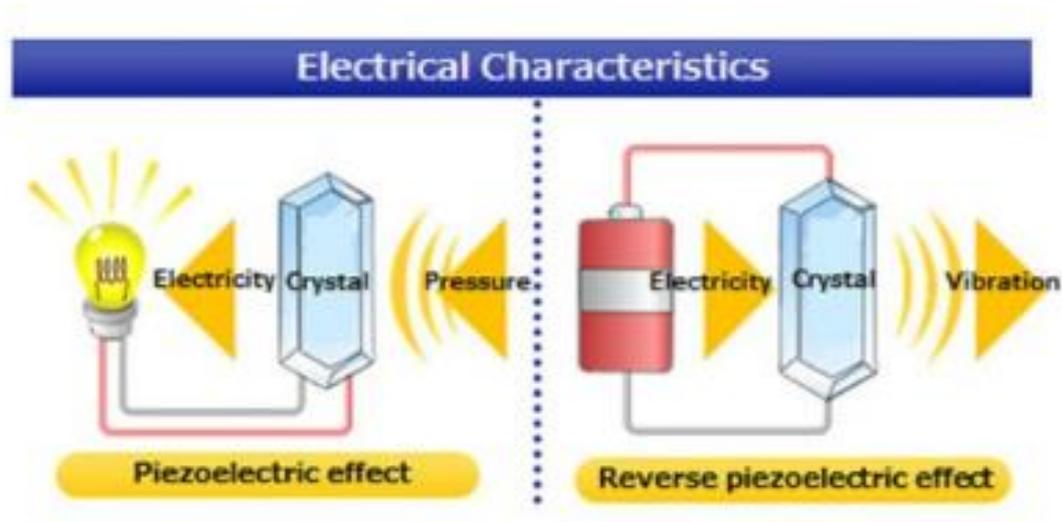


Figura 5.2: Efecto piezoeléctrico directo e inverso (Fuente: [7])

Las ventajas de estas pastillas piezoeléctricas son las siguientes:

- Respuesta frecuencial amplia: Pueden capturar un gran abanico de frecuencias, por lo que pueden reproducir tonos graves y agudos con gran precisión.
- Durabilidad: Estas pastillas son poco susceptibles a la corrosión o desgaste en comparación con las pastillas magnéticas.
- Versatilidad: Debido a su amplia respuesta frecuencial y su capacidad para captar gran variedad de tonos, estas pastillas son adecuadas para gran variedad de estilos musicales, tales como el pop, rock y música acústica.

5.2 PRINCIPIO DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

En las pastillas magnéticas utilizadas en instrumentos musicales, como guitarras y violines eléctricos se utiliza el principio de inducción electromagnética. Establece que cuando un conductor eléctrico se encuentra en movimiento relativo con un campo magnético, se genera una fuerza electromotriz en el conductor, que inducirá una corriente eléctrica.

Fue descubierto por Michael Faraday en 1831, el cual expuso esta ley de la siguiente manera:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt}$$

Donde,

ε = Fuerza electromotriz

ϕ = Flujo del campo magnético

t = Tiempo transcurrido

La Ley de Faraday establece que la magnitud de la fuerza electromotriz en un circuito cerrado es directamente proporcional a la variación de flujo magnético a través de dicho circuito. La constante negativa se debe a la Ley de Lenz, que establece que la corriente inducida siempre se opone al cambio que la produce.

La Ley de Faraday tiene un peso fundamental para poder entender el fenómeno de la inducción electromagnética, utilizado por estas pastillas.

Las pastillas magnéticas utilizan varios imanes envueltos en una bobina de alambre de cobre. Estos imanes magnetizan las cuerdas metálicas que se sitúan sobre ellos. Al pulsar una cuerda, el campo magnético de la cuerda se modifica, lo que a su vez induce una corriente eléctrica en la bobina de la pastilla.

5.3 INSTRUMENTOS ACTIVOS Y PASIVOS

La diferencia fundamental entre un instrumento pasivo y otro activo es la utilización de fuentes de alimentación externas o no. Además, está muy relacionado con la impedancia de cada instrumento.

5.3.1 Impedancia

La impedancia es una propiedad eléctrica que describe la resistencia a la corriente en un circuito y se mide en ohmios (Ω). En el contexto de los instrumentos musicales eléctricos, la impedancia juega un nivel muy importante en la conexión de las pastillas y los amplificadores. Por ello, la impedancia de salida de una pastilla debe ser compatible con la impedancia de entrada para poder garantizar una transferencia óptima de señal.

5.3.2 Pastillas pasivas

Las pastillas pasivas son dispositivos electromagnéticos utilizados en instrumentos musicales como las guitarras y violines eléctricos. Suelen estar ubicadas directamente en el puente o bajo él. Estas pastillas no requieren de fuentes de alimentación o pilas, eso quiere decir que un violín eléctrico pasivo no tiene batería o circuito electrónico.

Suelen generar una señal de salida más débil que las pastillas activas, pero no por ello son peores. De hecho, su sonido suele ser más cálido

5.3.3 Pastillas activas

Por otra parte, las pastillas activas necesitan una fuente de alimentación externa o una pila (generalmente de 9V). Estas pastillas están integradas junto a un preamplificador, lo que les permite controlar el sonido de una forma más manual. Los violines eléctricos que cuentan con este tipo de pastillas suelen tener control de ecualización, lo que les permite ajustar el tono de una manera más precisa, sin necesitar una mesa de sonido externa. De esta forma, se pueden potenciar o disminuir las frecuencias graves y agudas en función del gusto del intérprete.

6. Tipos de cuerdas

En el violín existen diferentes tipos de cuerdas que producen diferentes tonos y cualidades del sonido y por consecuencia, diferentes respuestas frecuenciales. Se dividen en 3 grandes tipos:

6.1 CUERDAS DE TRIPA

Este tipo de cuerda es el más antiguo con diferencia. Se fabrican a partir de fibras naturales provenientes de los intestinos de animales como ovejas, cabras o corderos. Se caracterizan por poseer una alta elasticidad, lo que permite una rápida respuesta a la presión del arco y los dedos del intérprete. Su sonido es cálido y rico, pero tienen menor potencia y proyección de sonido. Son muy apreciadas por violinistas fieles a la música clásica pero debido al tipo de material son más costosas y susceptibles al desgaste en comparación con los materiales más modernos.

6.2 CUERDAS SINTÉTICAS

Las cuerdas sintéticas se fabrican a partir de materiales sintéticos, como el nailon o perlón. Estos polímeros son muy utilizados ya que proporcionan una buena combinación de elasticidad y resistencia, aunque no tanto como las metálicas. Su sonido es equilibrado y versátil, ya que pueden adaptarse prácticamente a cualquier estilo musical. En comparación con las cuerdas de tripa, son menos sensibles a cambios de temperatura y humedad, por lo que son muy aptas para cualquier escenario.

6.3 CUERDAS METÁLICAS

Este último tipo son conocidas por su alta durabilidad y resistencia al desgaste. Están compuestas generalmente de acero, aunque algunas marcas utilizan aleaciones o recubrimientos adicionales para mejorar sus características. El acero utilizado es de alta resiliencia y flexible a la vez, para poder soportar la tensión requerida. Estas cuerdas tienen un sonido brillante y ofrecen gran gama de armónicos, lo que las hace ideales para su uso en entornos grandes. Además, debido a su composición metálica, también son más potentes.

7. Oído humano

7.1 ANATOMÍA Y FUNCIONAMIENTO

El oído humano es el órgano responsable de procesar y captar los sonidos. Es el encargado de recibir las informaciones sonoras y transmitir las al cerebro, para que después se puedan analizar y procesar. Además, también tiene una gran importancia en el equilibrio del cuerpo. Es un órgano frágil y propenso a lesionarse, por lo que se debe cuidar correctamente. [8]

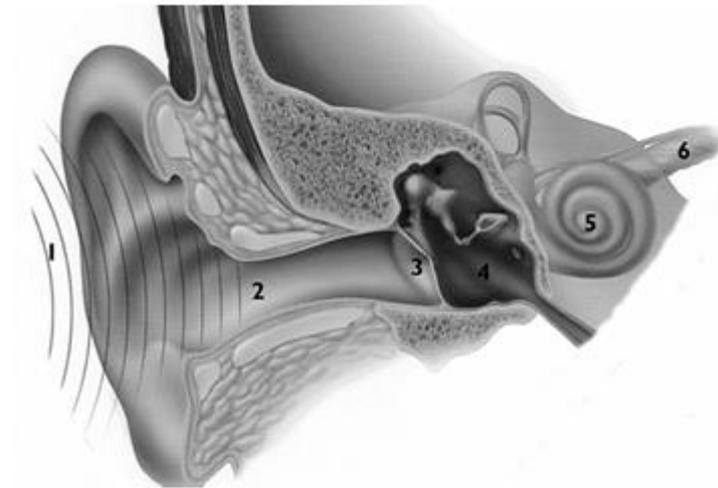


Figura 7.1: El oído transforma las ondas esféricas en planas (Fuente: [8])

El oído interno es una de las partes más complejas del sistema auditivo. Contiene la cóclea, una estructura con forma de caracol encargada de convertir esas vibraciones en señales eléctricas para el procesamiento por parte del cerebro. Su funcionamiento es el siguiente:

- 1) Las vibraciones amplificadas por los huesecillos llegan a la cóclea, que se encuentra en el oído interno.
- 2) Estas vibraciones se propagan a lo largo de la cóclea, con forma de caracol, y hacen vibrar la membrana basilar (estructura en forma de banda que recorre la longitud de la cóclea).
- 3) Desplazamiento del líquido: El movimiento de la membrana basilar provoca el desplazamiento del líquido que llena la cóclea.
- 4) A medida que este líquido se desplaza, unas células ubicadas en el órgano de Corti, llamadas “células ciliadas sensoriales” se doblan, lo que ocasiona una apertura en los canales iónicos en su membrana
- 5) Cuando se abren estos canales iónicos, se permite la entrada de iones, lo que genera señales eléctricas
- 6) Estas señales eléctricas se transmiten al nervio auditivo, que las llevará al cerebro, específicamente a la corteza auditiva en el lóbulo temporal
- 7) Finalmente, el cerebro recibe las señales eléctricas y las interpreta, para poder comprender los diferentes aspectos del sonido, como el volumen, timbre y su ubicación espacial.[9]

7.2 LA CÓCLEA

La cóclea tiene una capacidad excepcional para analizar el sonido. Dentro de ella, se da a cabo un concepto muy interesante, la tonotopía pasiva. Este término se refiere a la organización espacial de la cóclea en relación con las frecuencias de los sonidos. En otras palabras, es la disposición de las células ciliadas sensoriales a lo largo de la membrana basilar, donde las diferentes partes de esta membrana son más susceptibles a diferentes frecuencias. En la siguiente imagen se aprecia una representación gráfica:

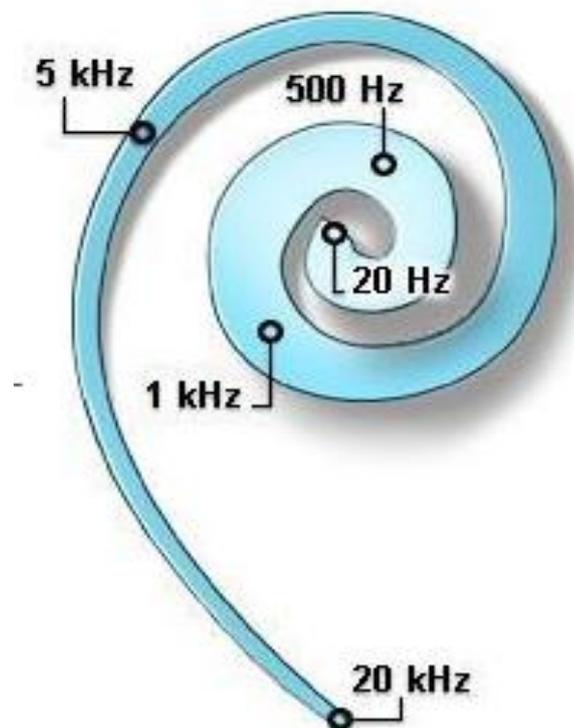


Figura 7.2: Organización tonotópica de la cóclea (Fuente:[10])

El oído humano es capaz de percibir un rango de frecuencias comprendidas entre los 20 y 20.000 Hz, sin embargo, es importante tener en cuenta que la capacidad auditiva puede variar entre diferentes individuos

Derivado de la organización tonotópica, la cóclea también tiene la capacidad de amplificar selectivamente o discriminar ciertas frecuencias para mejorar la audición.

Las células ciliadas pueden contraerse gracias a su motilidad o contracción electro motil, una propiedad que les permite cambiar de longitud en respuesta a señales eléctricas. Dependiendo de la polaridad de la señal, se contraen o alargan. Este mecanismo activo se conoce como amplificación coclear y permite que el sistema auditivo pueda detectar y discriminar con mucha precisión las frecuencias de los sonidos, especialmente cuando la intensidad es baja o hay mucho ruido.[11]

Cuando las ondas sonoras llegan a la cóclea, se propagan a través de un fluido llamado endolinfa, que llena el conducto coclear. Estas ondas generan una interacción compleja entre las propiedades físicas del fluido y la estructura corporal de la cóclea, lo que produce una resonancia selectiva en la región específica de la membrana basilar que corresponde a

la frecuencia de la onda sonora. Es en esta región donde la onda se amplifica y se genera una onda estacionaria.

Las ondas estacionarias generadas no se propagan a lo largo de toda la cóclea de manera lineal, si no que se forman en diferentes regiones específicas, que corresponden a las diferentes frecuencias disponibles en el espectro audible del oído humano. Estas regiones tienen el nombre de “lugares de resonancia tonotópica”.

El oído humano tiene una respuesta no lineal al sonido, es decir que, si por ejemplo aumentamos la intensidad de un sonido a el doble, nuestro oído no interpretará que estamos escuchando el doble de fuerte. En cambio, la percepción del sonido sigue una escala logarítmica.[12]

En esta escala logarítmica, un incremento de 10dB (decibelios) representa en la intensidad del sonido un factor de 10. Por ejemplo, un sonido de 70dB es 10 veces más intenso que uno de 60dB. De la misma manera, un sonido de 80dB es 10 veces más intenso que uno de 70dB.

En conclusión, la cóclea es una de las estructuras más importantes en el oído. Es la responsable de que podamos distinguir diferentes frecuencias con diferentes intensidades ya que actúa como un sistema de análisis y codificación de señales sonoras. Esta capacidad es esencial para la audición y nos permite comprender la ciencia auditiva de una forma detallada y precisa.

7.3 CURVA ISOFÓNICA

El oído humano, como se ha explicado anteriormente es capaz de percibir un rango de frecuencias comprendidas entre los 20 y 20.000 Hz. Sin embargo, no responde de igual forma a todas las frecuencias, ya que es más sensible frente a las frecuencias medias. La curva que define esta característica es conocida como curva isofónica.

Una curva isofónica es una representación gráfica en la que se muestra la relación entre el nivel de presión sonora (dB) y la frecuencia (Hz) en un ambiente determinado. A esta curva también se le conoce como curva de igual nivel o de igual audibilidad. En otras palabras, se utiliza para ver cómo el oído humano escucha diferentes rangos de frecuencias a diferentes niveles de volúmenes.

De esta curva isofónica se pueden observar ciertos sucesos:

- La audición humana es más sensible en el rango de frecuencias de 2 a 4 kHz, mientras que es más sensible a las frecuencias extremadamente bajas y altas. Es decir, nuestro oído no tiene una respuesta lineal frente a todas las frecuencias.
- A medida que aumenta la intensidad sonora las curvas se hacen cada vez más planas. Esto quiere decir que conforme se va aumentando el volumen, se obtiene menor dependencia de la frecuencia. Esta capacidad proviene del tímpano, que se tensa para protegerse de los altos volúmenes.[13]

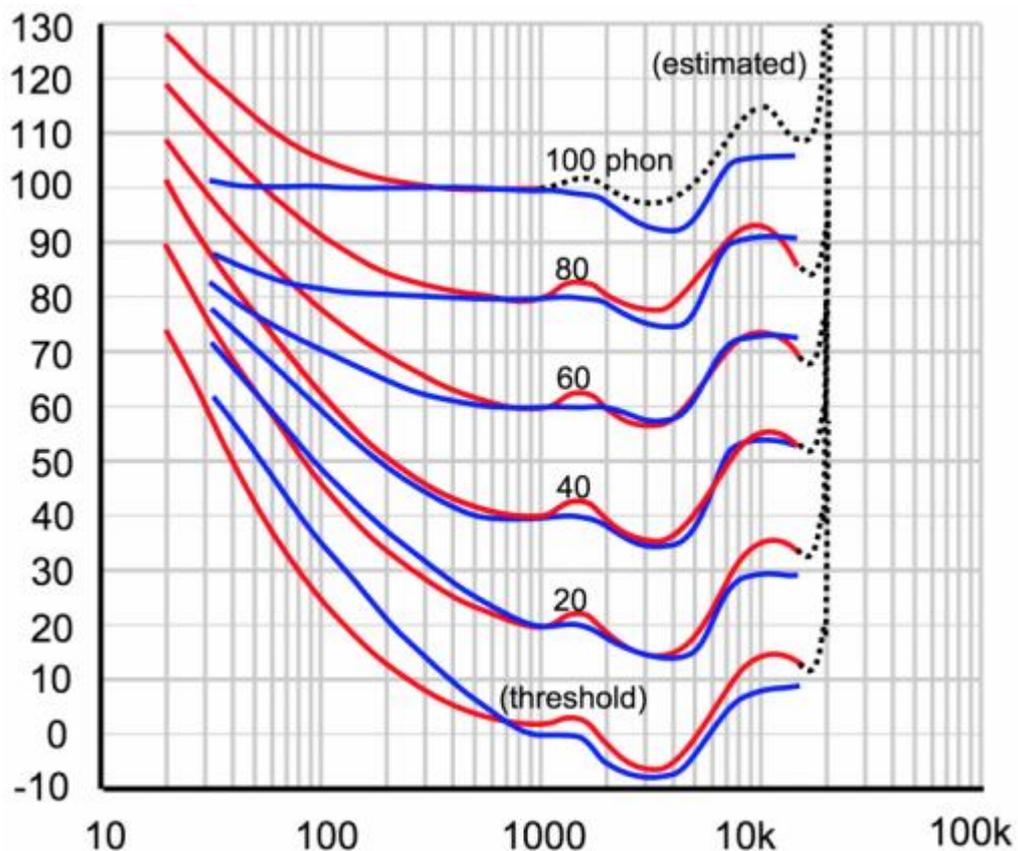


Figura 7.3: Curva isofónica (Fuente:[13])

8. Estándar MPEG-1 y mp3

Las siglas MPEG-1 se refieren a un sistema de compresión de audio desarrollado y normalizado por el grupo MPEG (Moving Picture Experts Group). Fue lanzado en 1993 y está considerado como el primer estándar de compresión de audio y vídeo plenamente adoptado en la industria. Dentro de él, se incluye el formato de compresión de audio conocido como MP3 (MPEG-1 Audio Layer).

El formato MP3 fue diseñado exclusivamente para la compresión de archivos de audio y nos permite una reducción significativa del tamaño de los archivos de audio sin demasiada pérdida perceptible de calidad. Este formato utiliza la compresión con pérdida, lo que significa que elimina cierta información del archivo original para reducir su tamaño.

El proceso de compresión MP3 se basa en la psico acústica, una rama de la psicología encargada de estudiar la percepción del sonido y como afecta éste al ser humano. El algoritmo MP3 aprovecha las limitaciones de la audición humana para eliminar selectivamente información que es mucho menos perceptible para el oído humano. Todo ello se consigue lograr mediante técnicas como la eliminación de frecuencias inaudibles (el rango de frecuencias audible por el oído humano se comprende entre los 20 y 20.000 Hz), la reducción de precisión en la representación de algunas frecuencias y el uso de la codificación de longitud de trama variable. El resultado de compresión de un archivo .mp3 es uno mucho más pequeño que el original, sin embargo, existe una pequeña degradación de calidad del audio en el proceso.

Aunque la calidad pueda ser aceptable en la mayoría de las ocasiones, en casos más técnicos y especializados se recomienda el uso de ficheros tipo .WAV o .FLAC.

El algoritmo MP3 utiliza una de las características del oído humano muy peculiar: la sensibilidad variable a diferentes frecuencias de audio. Aprovecha esta característica priorizando en su representación las frecuencias más perceptibles por nuestro oído y reduciendo la precisión en las frecuencias menos perceptibles. Esto permite una reducción muy significativa del archivo al poder eliminar cierta información que el oído tiene dificultad para percibir.

El algoritmo MP3 también utiliza otra característica del oído humano: la máscara auditiva. Puede enmascarar o hacer menos perceptibles sonidos más débiles en frecuencias cercanas.

Por ejemplo, si hay un sonido con una alta frecuencia muy fuerte y también suena otro audio con una frecuencia similar pero más débil, el oído discriminará esa frecuencia “menos importante”. Esto solo funciona en frecuencias cercanas. En frecuencias diferentes, el oído puede retener la información perfectamente. El algoritmo MP3 utiliza entonces esta propiedad para eliminar la información redundante o inaudible en presencia de sonidos más fuertes.

El proceso de codificación implica las siguientes etapas:

- 1) Muestreo: El audio analógico registrado se convierte en una señal digital mediante un proceso de muestreo. Se toman muestras de la forma de onda del sonido a intervalos regulares y se cuantifican para representar la amplitud digitalmente.
- 2) Descomposición en frecuencias: Mediante una técnica conocida como Transformada de Fourier de Tiempo Corto (STFT), se divide la señal en diferentes bandas de frecuencias.
- 3) Modelado psico acústico: El algoritmo MP3 utiliza los modelos psico acústicos descritos anteriormente para determinar qué partes de la señal del audio son las más perceptibles e importantes para el oído humano. Se basa en cómo el oído humano responde a diferentes frecuencias y niveles de sonido.
- 4) Codificación de subbandas: El audio se divide en diferentes subbandas de frecuencias, para posteriormente aplicar las técnicas de compresión específicas a cada subbanda. Dentro de estas técnicas se incluyen la eliminación de frecuencias redundantes o inaudibles para el oído humano y la cuantificación precisa de aquellas frecuencias más perceptibles.
- 5) Compresión con pérdida: El algoritmo MP3 utiliza la compresión con pérdida, lo que significa que se elimina la información redundante para reducir el tamaño del archivo. Esta reducción puede llegar a ser hasta 10 o 12 veces más pequeño que el original.
- 6) Decodificación: Para reproducir el audio, se debe decodificar el archivo MP3. Esto implica revertir los pasos de compresión para recrear la señal de audio digitalizada originalmente.

9. Transformada de Fourier

La transformada de Fourier es una herramienta esencial matemática que permite descomponer una señal o función en el dominio del tiempo, en sus componentes de frecuencia. Fue desarrollada por el matemático Jean-Baptiste Joseph Fourier en el siglo XIX y es utilizada en muchos campos, como la física, la ingeniería, la matemática aplicada y el procesamiento de señales.

La idea fundamental de la transformada de la Transformada de Fourier es que cualquier señal periódica o no periódica en el dominio del tiempo puede ser descompuesta en una integral de señales sinusoidales de diferentes frecuencias, cada una con una amplitud y fases características. Es decir, que descompone cualquier señal en una suma de sinusoides de diferentes frecuencias, revelando así su espectro de frecuencias.

La Transformada de Fourier se define matemáticamente de la siguiente forma:

$$f(\omega) = \int [f(t) * e^{-j\omega t}] dt$$

Donde,

- $f(\omega)$ =Transformada de Fourier de la función $f(t)$
- ω = Frecuencia angular
- t = Tiempo

La Transformada de Fourier nos proporciona una representación en el dominio de la frecuencia de una señal en el dominio del tiempo. El resultado de la transformada es una función compleja que representa las amplitudes y fases de las diferentes componentes de frecuencias presentes en la señal original. [14]

La Transformada de Fourier se puede aplicar tanto a señales continuas como discretas. En el caso de señales continuas, la integral se reemplaza por una suma ponderada de exponenciales complejas. En el caso de señales discretas, la Transformada de Fourier se conoce como Transformada Discreta de Fourier (DFT) y se calcula utilizando algoritmos como la Transformada rápida de Fourier (FFT).

La FFT utiliza la simetría de las funciones exponenciales complejas y la técnica de división y conquista para calcular rápidamente la Transformada de Fourier, siendo ampliamente utilizada en el procesamiento de señales en diversas aplicaciones.

Al estudiar la respuesta frecuencial de un violín acústico, la transformada de Fourier nos permite analizar las componentes de frecuencia generadas por la vibración de las cuerdas, la caja de resonancia y otros elementos del instrumento. Cada nota tocada en el violín acústico estará compuesta por una combinación de diferentes frecuencias que corresponden a los armónicos naturales de las cuerdas y las vibraciones de la caja de resonancia. Por otro lado, el violín eléctrico también puede ser analizado utilizando la transformada de Fourier para examinar su respuesta frecuencial. A diferencia del violín acústico, el violín eléctrico utiliza pastillas conductoras que transforman la vibración mecánica en una señal eléctrica, para posteriormente ser amplificada.

En conclusión, la transformada de Fourier desempeña un papel fundamental en el análisis de señales de todo tipo y en este caso, es especialmente útil para poder observar y comparar analíticamente las diferencias entre dos instrumentos aparentemente similares, pero con diferentes características de sonido. Esto nos permite apreciar de manera clara y concisa las particularidades que los distinguen y entender cómo se manifiestan esas diferencias en la música.

10. Análisis de audio

Un analizador de audio es un dispositivo o herramienta que se utiliza para medir y visualizar diversas características y parámetros de una señal de audio. Este nos puede proporcionar diversa información detallada sobre las propiedades de una señal, como su amplitud, fase, espectro de frecuencia, contenido armónico, distorsión y ruido, entre otros. Consta generalmente de un hardware y software especializados. En el hardware se incluyen entradas de audio en las que se pueden conectar fuentes de sonido, como micrófonos o instrumentos, además de un conversor A/D (Analógico-Digital), que convierte la señal analógica de audio en una representación digital visible. El software es el encargado de analizar y procesar los datos del audio, extrayendo la información relevante.

En el análisis frecuencial de este proyecto buscaremos comparar un violín acústico y un violín eléctrico, explorando y comparando 2 de sus características principales del audio: la señal de salida y el espectro de audio.

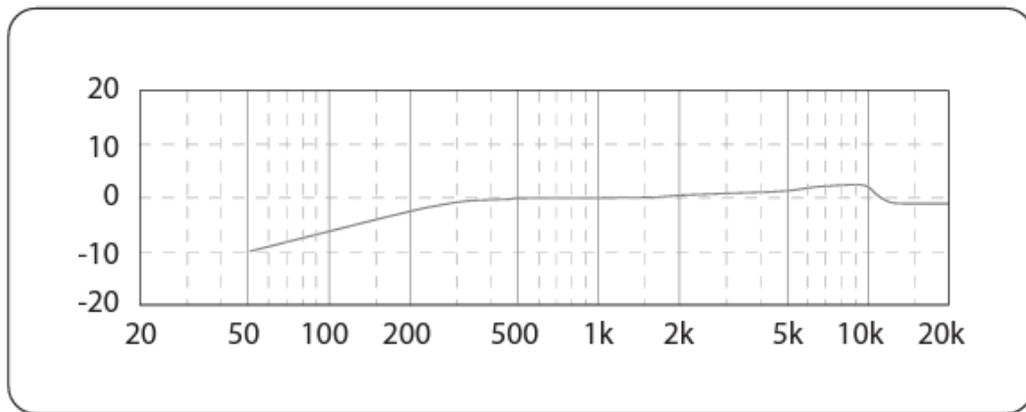
10.1 SEÑAL DE SALIDA

La señal de salida se refiere a la forma de onda que se produce cuando se toca una nota cualquiera en el violín. Como previamente se ha explicado, en el violín acústico la señal de salida es generada por la vibración de las cuerdas para luego ser proyectada y amplificada por la caja de resonancia. En cambio, en un violín eléctrico, la señal generada por las cuerdas es directamente enviada a un sistema de sonido o amplificador. Esta diferencia puede resultar en variaciones en la calidad del sonido y su timbre.

Para recrear esta primera parte del estudio se han utilizado los siguientes dispositivos:

- Violín acústico, hecho a mano el 4 de abril de 2014, por Manuel Isidoro de Prado Salas
- Violín eléctrico, Yamaha Yev-104 TBL.
- Tarjeta de sonido M-Audio M-Track DUO.
- Micrófono Behringer, de alimentación Phantom.
- Herramienta software Matlab.
- Correspondiente sistema de conexionado.

La curva de respuesta del micrófono behringer utilizado es prácticamente lineal, como se muestra a continuación:



Respuesta en frecuencia

Figura 10.1: Curva de respuesta del micrófono utilizado (Fuente: Hoja de características behringer C2 [2023])

En esta gráfica se muestra la respuesta en frecuencias en el rango audible por el oído humano. Es prácticamente lineal, aun así, en las frecuencias más graves, como es el caso de la cuarta nota del violín, de 196 Hz, hay que tener en cuenta que puede fluctuar debido a la pequeña pendiente mostrada en la figura.

El código utilizado en Matlab es el siguiente:

```

Editor - C:\Users\victo\OneDrive\Escritorio\TFG\Matlab\ analisis_onda.m
analisis_onda.m x +
1 % Analizador audio
2 clear all
3 audio=audiorecorder(44100,24,1); %Configuración de toma de muestras de audio
4 figure; %Crea figura vacía
5
6
7 for k=1:1000 %Duración de la toma de audio
8 record(audio); %Empieza a registrar el audio
9 pause(.01); %Pausa de .01 segundos
10 stop(audio); %Detiene la toma de muestras de audio
11 au=getaudiodata(audio); %En au se guarda el vector de datos de audio
12
13 clf %Limpia figura
14 plot(1:length(au),au,'r','linewidth',1.5)
15 xlim([0 500]);
16 ylim([-0.5 0.5]);
17 grid on %Adicionar grilla
18 hold on %Mantener curva
19 end

```

Figura 10.2: Analizador de audio en Matlab (Fuente: elaboración propia)

Este código funciona de la siguiente forma:

- 1) Se utiliza la función **“clear all”** para eliminar y limpiar todas las variables en el espacio de trabajo de Matlab.
- 2) Se configura la grabación de audio utilizando la función **“audiorecorder”**. En este caso especificamos una frecuencia de muestreo de 44100 Hz, una resolución de bits de 24 y un canal mono.
- 3) Se crea una figura utilizando la función **“figure”**. Esto establece el espacio para mostrar la gráfica en tiempo real de la señal de audio.
- 4) Se inicia un bucle **“for”** con 50 iteraciones para realizar la toma de muestras de audio y la actualización de la gráfica en tiempo real.
- 5) Dentro del bucle, se inicia la grabación de audio utilizando la función **“record”**.
- 6) Se pausa durante 0.01 segundos utilizando la función **“pause”** para permitir la captura del audio.
- 7) Se detiene la grabación utilizando la función **“stop”**.
- 8) Se obtienen los datos de audio grabados utilizando la función **“getaudiodata”** y se guarda en la variable **“au”**.
- 9) Se limpia la figura utilizando la función **“clf”** para eliminar la gráfica anterior y prepararla para la actualización.
- 10) Se plotea la señal de audio en la gráfica utilizando la función **“plot”**. El eje x representa la muestra de tiempo y el eje y representa la amplitud de la señal de audio. El argumento **“r”** establece el color de la línea en rojo, y los argumentos **“linewidth”, 1.5”** establecen el grosor de la línea.
- 11) Se ajustan los límites a un rango fijo de 0 a 500z utilizando la función **“xlim”**.
- 12) Se ajustan los límites del eje y a un rango fijo de -0.5 a 0.5 utilizando la función **“ylim”**.
- 13) Se activa la grilla en la gráfica utilizando la función **“grid on”**.
- 14) Se utiliza la función **“hold on”** para mantener la curva en la gráfica y evitar que se borre en cada iteración del bucle.
- 15) El bucle **“for”** se repite 50 veces para realizar la grabación y actualización de la gráfica en tiempo real.

En resumen, este código muestra una gráfica en tiempo real de la señal de audio capturada utilizando la función “audiorecorder”. Cada iteración del bucle actualiza la gráfica con una nueva muestra de audio.

Cuerda de SOL (196Hz):

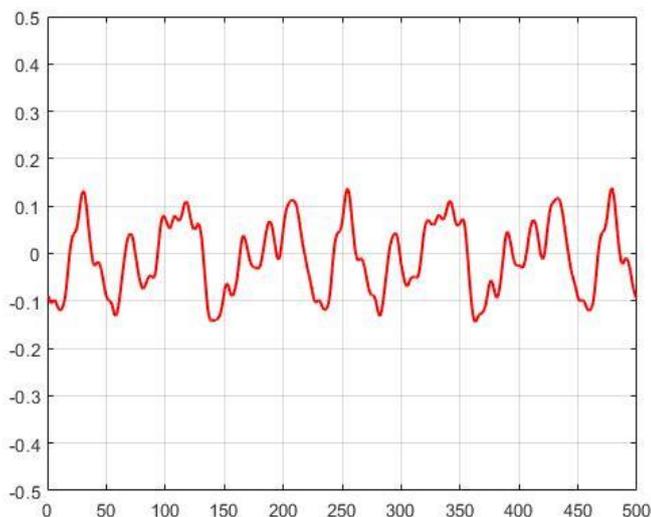


Figura 10.3: Forma de onda de la cuerda de sol (Fuente: Violín acústico)

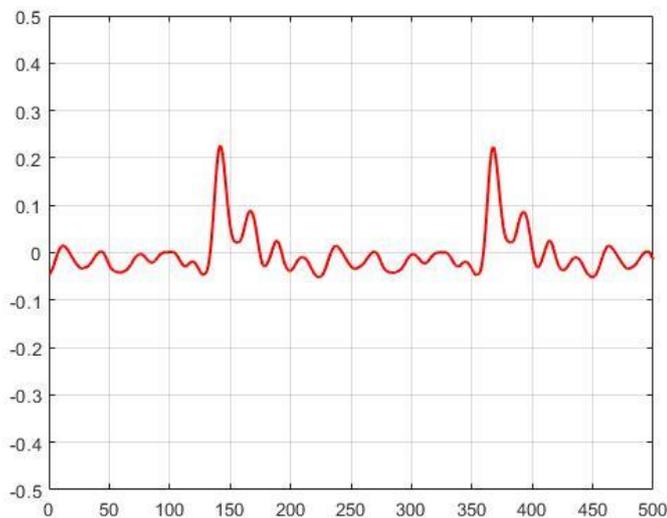


Figura 10.4: Forma de onda de la cuerda de sol (Fuente: Violín eléctrico)

Cuerda de RE (293,7 Hz):

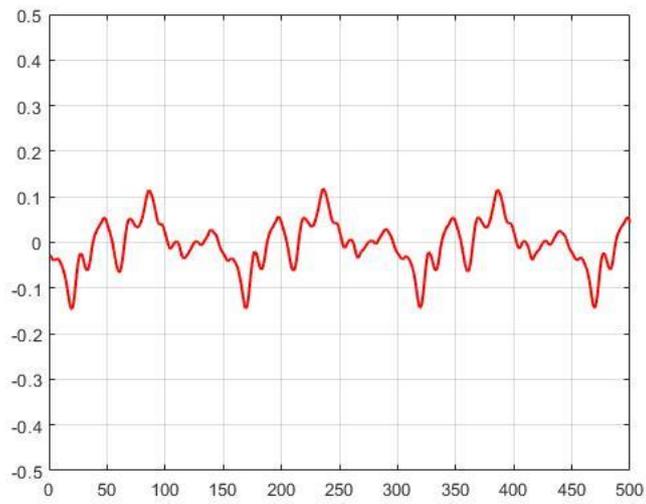


Figura 10.5: Forma de onda de la cuerda de re (Fuente: Violín acústico)

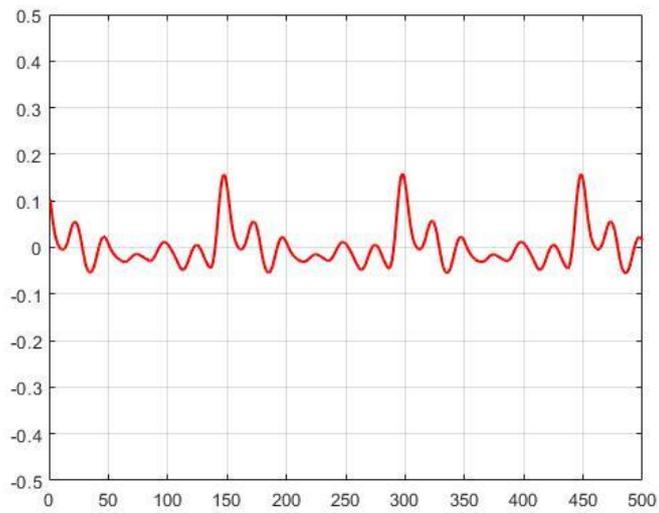


Figura 10.6: Forma de onda de la cuerda de re (Fuente: Violín eléctrico)

Cuerda de LA (440Hz):

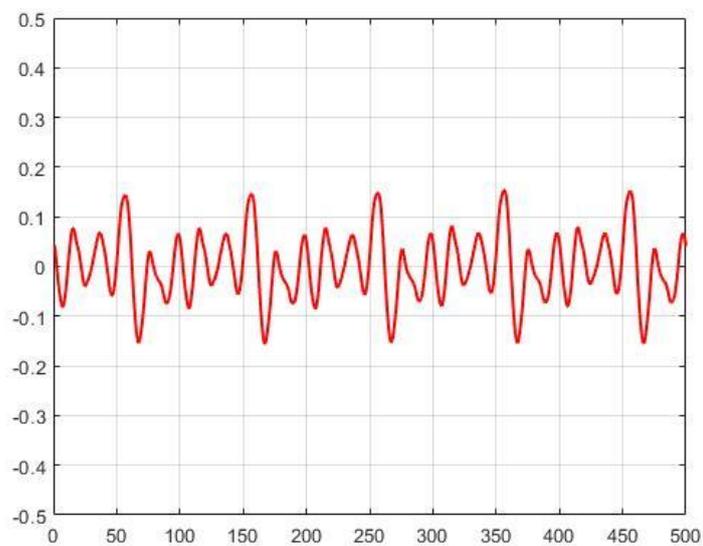


Figura 10.7: Forma de onda de la cuerda de la (Fuente: Violín acústico)

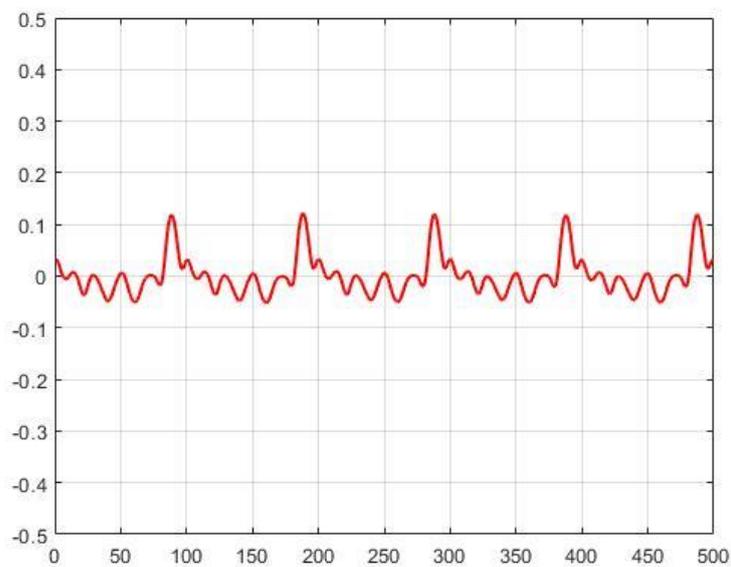


Figura 10.8: Forma de onda de la cuerda de la (Fuente: Violín eléctrico)

Cuerda de MI (659,3 Hz):

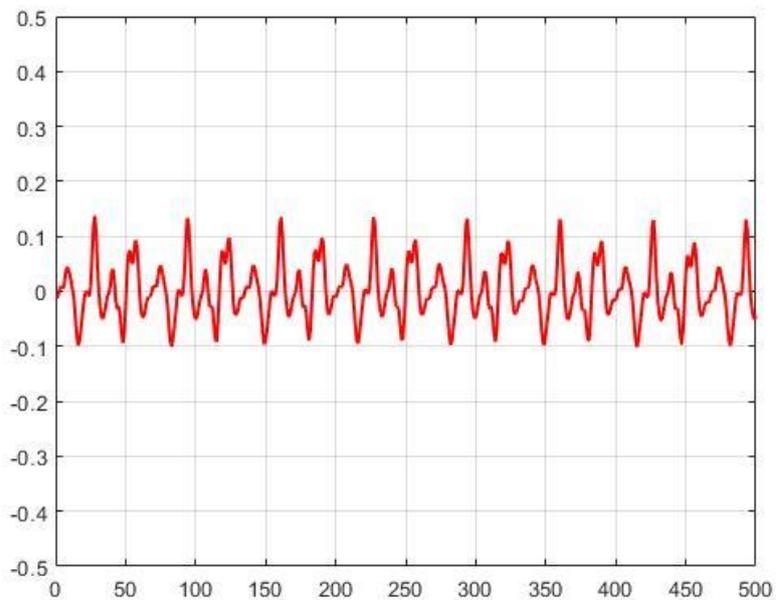


Figura 10.9: Forma de onda de la cuerda de mi (Fuente: Violín acústico)

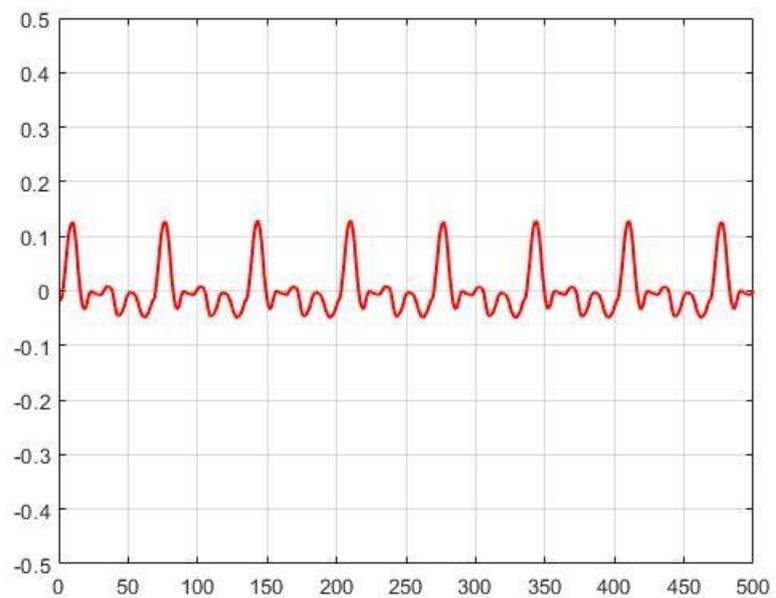


Figura 10.10: Forma de onda de la cuerda de mi (Fuente: Violín eléctrico)

Observando las diferentes imágenes de las ondas producidas por el violín acústico y el eléctrico podemos afirmar lo siguiente:

- Las ondas producidas por el violín acústico son bastante diferentes entre sí y especialmente la cuerda de SOL. No parece existir ninguna correlación o patrón entre ellas.
- Las ondas producidas por el violín acústico se parecen bastante entre sí. Se puede observar que tienen dirección descendente en cada periodo.
- A la hora de producir el sonido se ha intentado mantener siempre la misma fuerza e intensidad, pero debido al fallo humano, es posible que la amplitud de alguna onda sea mayor que las demás.
- Se puede apreciar que las ondas producidas por el violín acústico están más centradas respecto al eje del tiempo. En cambio, las ondas producidas por el violín eléctrico parecen estar ligeramente por encima del eje del tiempo.
- Como es normal, se aprecia que a medida que cambiamos las notas en dirección ascendente, también aparecen mayor número de ondas, ya que se está aumentando la frecuencia.

La utilidad de obtener la forma de onda de tanto del violín acústico como del eléctrico reside en su recreación en los procesos de síntesis. Al recrear esta forma de onda mediante un sintetizador, se pueden explorar diferentes manipulaciones y efectos que no son posibles con un violín real.

Un sintetizador es un instrumento musical electrónico que genera sonidos mediante la manipulación de señales eléctricas o digitales. El proceso de funcionamiento es el siguiente:

- 1) Generación de señales: El sintetizador comienza generando una o varias señales de audio básicas, conocidas como osciladores. Estos osciladores producen ondas de

sonido de diferentes formas, como ondas sinusoidales, cuadradas, triangulares o de diente de sierra. Cada forma tiene características sonoras únicas.

- 2) **Modificación del sonido:** Después de generar las señales de audio básicas, el sintetizador permite modificarlas mediante diversos procesos. Algunas de las técnicas más comunes incluyen la modificación de frecuencia, síntesis aditiva, síntesis sustractiva y síntesis de tabla de ondas. Estos procesos permiten dar forma al sonido y crear una amplia variedad de timbres y texturas.
- 3) **Control de parámetros:** Los sintetizadores cuentan con una serie de parámetros que se pueden ajustar para controlar el sonido. Estos parámetros incluyen la frecuencia, la amplitud, la resonancia y la modulación, entre otros. Mediante elementos de control tales como teclados, perillas y pantallas se pueden controlar.
- 4) **Procesamiento adicional:** Algunos sintetizadores poseen también efectos de procesamiento adicional, como la reverberación, ecualización y delay, entre otros.
- 5) Finalmente, el sonido procesado se envía a través de la interfaz de salida de audio del sintetizador.[15]

10.2 POLARIDAD DE LA SEÑAL

Mientras se hace el experimento se observa que para que éste sea preciso, siempre se debe tocar con el arco en la misma dirección, ya que si no la señal se invierte. Esta característica es conocida como polaridad de la señal. La polaridad de una señal se refiere a su orientación o dirección en relación con una referencia.

En el caso del violín o en otros instrumentos de cuerda frotada, el movimiento del arco sobre las cuerdas genera una vibración que produce cambios en la amplitud de la señal, acústica o eléctrica, dependiendo del instrumento. Cuando se mueve el arco hacia abajo, se produce una vibración descendente en las cuerdas, lo que resulta en un cambio de polaridad en la señal generada. En cambio, cuando se mueve el arco hacia arriba, se produce una vibración ascendente en las cuerdas, lo que resulta en una polaridad opuesta a la señal generada anteriormente.

La inversión de la señal puede parecer un fenómeno inesperado o extraño, pero es importante tener en cuenta que no afecta en absoluto al tono o el sonido producido por el violín, ya sea acústico o eléctrico.

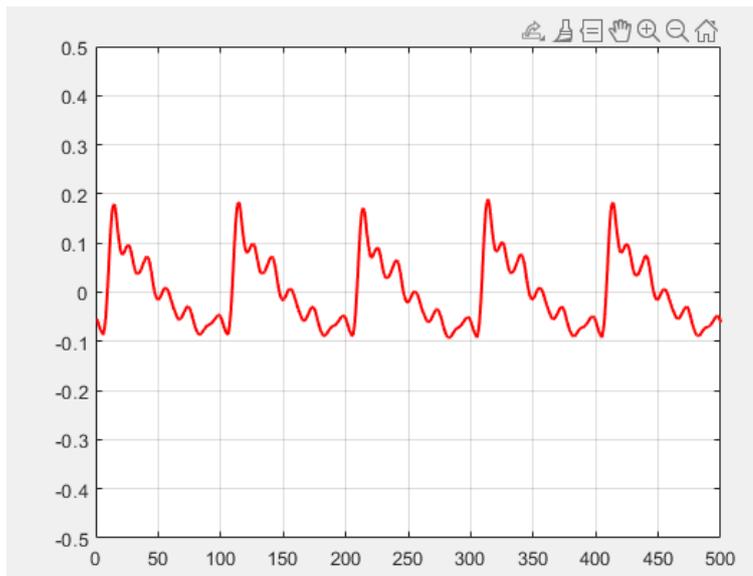


Figura 10.11: Forma de onda de una nota arco abajo (Fuente: Violín eléctrico)

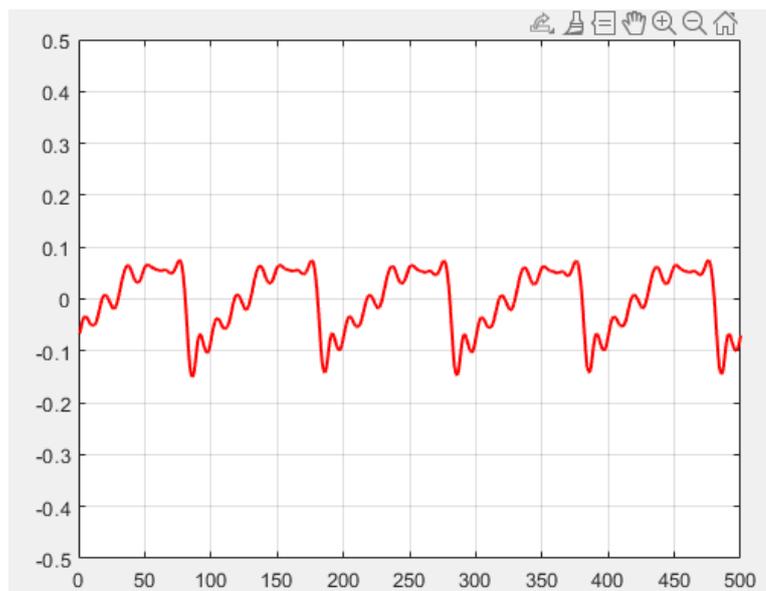


Figura 10.12: Forma de onda de una nota arco arriba (Fuente: Violín eléctrico)

Al utilizar un analizador de audio, es importante tener en cuenta la polaridad de la señal y considerar como puede afectar a los resultados obtenidos. Por ello, en este estudio se han experimentado con todas las señales arco abajo.

10.3 ESPECTRO DE AUDIO

Esta técnica es utilizada para visualizar y comprender la distribución de los niveles de energía en diferentes frecuencias presentes en una señal de audio cualquiera. Para ello se ha utilizado la herramienta Matlab, con el siguiente código:

```

1 - clear all
2 - audio = audiorecorder(44100, 24, 1); % Configuración de toma de muestras de audio
3 - figure; % Crea figura vacía
4
5 - for k = 1:50 % Duración de la toma de la muestra de audio
6 -     record(audio); % Empieza a registrar el audio
7 -     pause(0.01); % Pausa de 0.01 segundos
8 -     stop(audio); % Detiene la toma de muestras de audio
9 -     au = getaudiodata(audio); % En au se guarda el vector de datos de audio
10
11 -     clf; % Limpia figura
12
13 -     % Cálculo de la FFT
14 -     L = length(au); % Longitud de la señal de audio
15 -     Fs = 44100; % Frecuencia de muestreo
16 -     NFFT = 2^nextpow2(L); % Próxima potencia de 2 mayor o igual a L
17 -     Y = fft(au, NFFT) / L; % Cálculo de la FFT normalizada
18 -     f = Fs / 2 * linspace(0, 1, NFFT/2 + 1); % Eje de frecuencia
19
20 -     % Graficar espectro de frecuencia
21 -     plot(f, 2 * abs(Y(1:NFFT/2 + 1)), 'r', 'linewidth', 1.5);
22 -     xlim([0 20000]);
23 -     grid on; % Adicionar grilla
24
25 -     xlabel('Frecuencia (Hz)');
26 -     ylabel('Amplitud');
27 -     title('Espectro de frecuencia del audio');
28
29 -     hold on; % Mantener curva
30
31 -     % Fijar rango del eje y
32 -     ylim([0 0.3]);
33 - end
34

```

Figura 10.13: Analizador de espectro de audio en Matlab (Fuente: elaboración propia)

El funcionamiento de este código deriva del analizador de audio anterior y funciona de la siguiente forma:

- 1) La línea “clear all” se utiliza para limpiar todas las variables existentes en el espacio de trabajo antes de ejecutar el código.
- 2) La línea “audio=audiorecorder(44100, 24, 1);” crea un objeto de grabadora de audio con una frecuencia de muestreo de 44100 Hz, una profundidad de bits de

24 y un solo canal de audio (en este caso administrado por la tarjeta de sonido M-AUDIO).

- 3) La línea “figure;” crea una figura vacía para mostrar el espectro de frecuencias de audio.
- 4) El bucle “for” se repite 50 veces y se utiliza para capturar, analizar y medir el tiempo en las muestras de audio.
- 5) En cada iteración del bucle, graba un fragmento de audio utilizando el objeto ”audio” con el comando “record(audio)”.
- 6) Pausa la ejecución del programa durante 0.01 segundos usando el comando “pause(0.01)”.
- 7) Detiene la grabación de audio con el comando “clf”.
- 8) Obtiene los datos de audio grabados y los guarda en la variable “au” usando el comando “getaudiodata(audio)”.
- 9) Limpia la figura actual usando el comando “clf”.
- 10) Calcula la Transformada Rápida de Fourier (FFT) de los datos de audio grabados utilizando el comando “fft(au, NFFT) / L”, donde “NFFT” es la próxima potencia de 2 mayor o igual a la longitud de los datos de audio “L”, y “L” es la longitud de los datos de audio.
- 11) Crea un vector de frecuencias “f” correspondiente al eje de frecuencia de la FFT calculada.
- 12) Encuentra la frecuencia máxima y su índice en el espectro de frecuencia utilizando los comandos “max(abs(Y))” y “f(índice_max)”, respectivamente, donde “Y” es el resultado de la FFT calculada.
- 13) Calcula los valores del eje y en función de la frecuencia máxima. El valor de la frecuencia máxima es 10 en el eje y, mientras que las otras frecuencias tienen valores proporcionales a su relación con la frecuencia máxima.
- 14) Grafica el espectro de frecuencia utilizando los valores calculados del eje y con el comando “plot(f, valores_y, ‘r’, ‘linewidth’, 1.5)”.
- 15) Establece los límites del eje x en el rango de 0 a 20.000 Hz utilizando el comando “xlim([0 20000])”.
- 16) Activa la grilla en el gráfico utilizando el comando “grid on”.
- 17) Etiqueta al eje x como “Frecuencia (Hz)” utilizando el comando “xlabel(‘Frecuencia(Hz)’)”.

- 18) Etiqueta al eje como “Amplitud” utilizando el comando “ylabel(‘Amplitud’)”.
- 19) Establece el título del gráfico como “Espectro de frecuencia del audio” utilizando el comando “title(‘Espectro de frecuencia del audio’)”.
- 20) Mantiene la curva en el gráfico mediante el comando “hold on”.
- 21) Fija el rango del eje y en el rango de 0 a 10, con el comando “ylim([0 10])”.

En resumen, el código creado graba fragmentos de audio actualizándolos en tiempo real y aplica la Transformada Rápida de Fourier para calcular y graficar su espectro de frecuencias. Es importante recalcar que representa en una escala de 0 a 10 el valor de cada armónico, en relación con el más fuerte, que tendrá un valor de 10.

Esto se debe a una modificación en el código respecto del original para abordar los problemas del audio entre el violín acústico y el violín eléctrico. En las versiones originales del código, se utilizaba un valor fijo en el eje y, lo cual generaba dificultades en la distinción uniforme de las dos fuentes de audio. Esto se debe a que cada violín tiene una entrada diferente. Por una parte, el violín eléctrico se conecta directamente a la tarjeta de sonido a través de un cable tipo Jack de 6.3 mm, mientras que el audio del violín acústico se captura mediante un micrófono con su propia impedancia característica.

Este código permite visualizar la relación entre las dos señales sin considerar la amplitud. De esta manera, se facilita la comparación y la identificación de las diferencias entre el violín acústico y el violín eléctrico en función de su espectro de frecuencia.

En este código se ha establecido el rango audible de frecuencias por el oído humano, es decir, hasta los 20.000Hz. Pero al hacer una prueba con cualquiera de los violines, se observa que a partir de los 8000Hz el valor de la amplitud de las frecuencias es apenas visible, por lo que utilizaremos ese rango a partir de ahora para una mejor comprensión.

En este estudio, ensayaremos las 4 cuerdas del violín acústico y del violín eléctrico, para ver cuáles son las diferencias fundamentales entre estos dos instrumentos.

Cuerda de SOL (196Hz):



Figura 10.14: Espectro de frecuencias de la cuerda de sol (Fuente: Violín acústico)

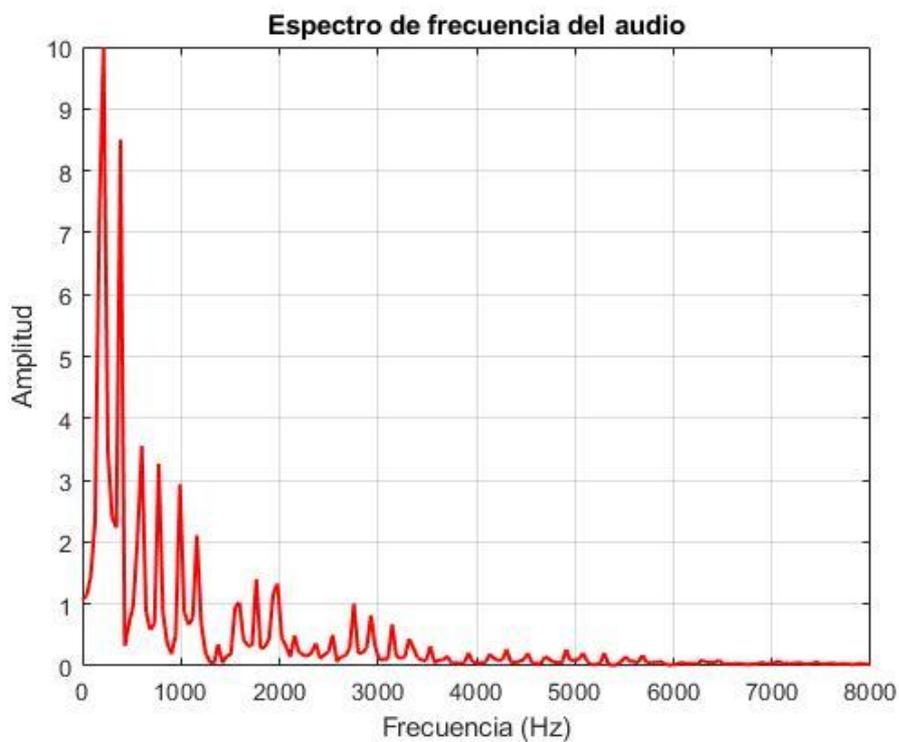


Figura 10.15: Espectro de frecuencias de la cuerda de sol (Fuente: Violín eléctrico)

- El primer armónico fundamental, de frecuencia igual a 196 Hz es casi inexistente en el violín acústico, mientras que en el violín eléctrico es el más pronunciado de todos.
- El segundo armónico, de frecuencia igual a 392 Hz es el más pronunciado en la versión acústica del violín. En cambio, en el violín eléctrico es el segundo, con un valor de 8,5.
- El tercer armónico, de valor 588 Hz, es ligeramente superior en el violín acústico que en el eléctrico.
- El cuarto armónico, de valor 784 Hz, es casi un punto mayor en el violín eléctrico respecto del acústico.
- El quinto armónico, de valor 980 Hz, es ligeramente superior en el violín eléctrico que en el acústico.
- Se observa gráficamente que los siguientes armónicos son considerablemente superiores en el rango de 1000-4000 Hz en favor del violín acústico.
- En las frecuencias comprendidas alrededor de los 4000 Hz son casi inexistentes los armónicos en el violín eléctrico, mientras que en el acústico son ciertamente visibles e importantes

Cuerda de RE (293,7Hz):

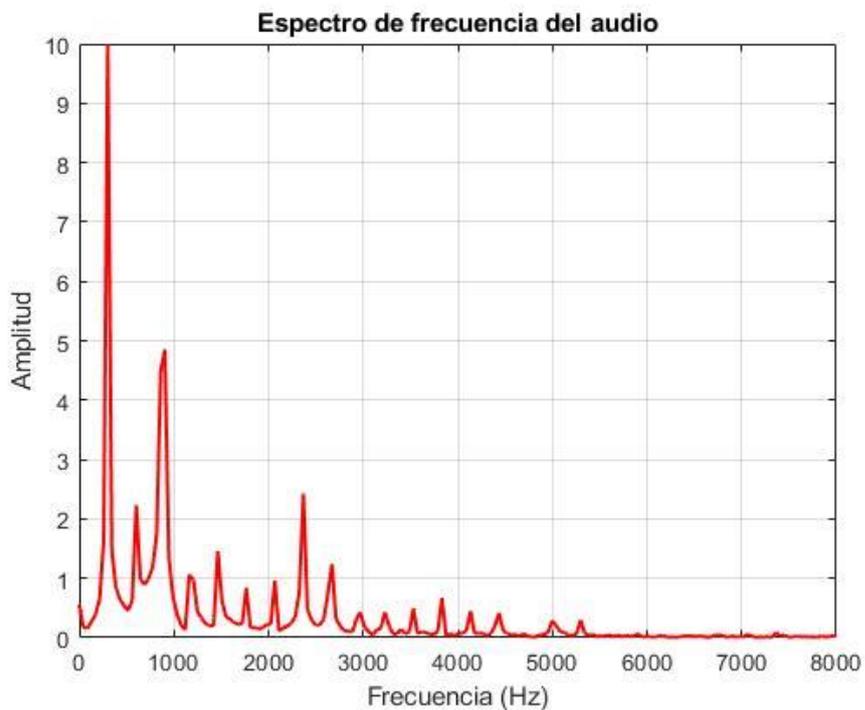


Figura 10.16: Espectro de frecuencias de la cuerda de re (Fuente: Violín acústico)



Figura 10.17: Espectro de frecuencias de la cuerda de re (Fuente: Violín eléctrico)

- El primer armónico fundamental, de frecuencia igual a 293,7 Hz es en los dos violines el más pronunciado con diferencia.
- El segundo armónico, de frecuencia igual a 587,4 Hz también guarda en general la proporción en los dos instrumentos.
- El tercer armónico, de frecuencia igual a 881,1 Hz es el segundo más pronunciado tanto en el violín acústico como en el violín eléctrico.
- El cuarto y quinto armónico, de frecuencia igual a 1174,8 y 1468.5 Hz respectivamente, son ligeramente superiores en la versión eléctrica del violín respecto del original.
- El séptimo armónico, de frecuencia igual a 2055,9 Hz, es considerablemente superior en el violín eléctrico frente al violín acústico.
- El octavo armónico, de frecuencia igual a 2349,6 Hz, es considerablemente superior en el violín acústico frente al violín eléctrico.
- Se observa que las frecuencias comprendidas entre los 4000 y 5000 Hz son casi inexistentes en el violín eléctrico, mientras que en el violín acústico son perceptibles.

Cuerda de LA (440Hz):

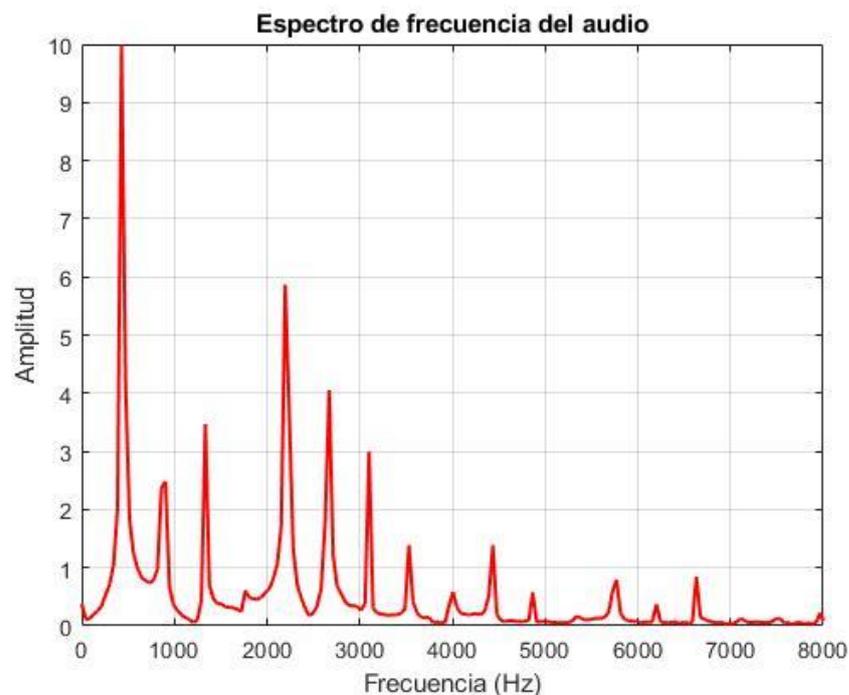


Figura 10.18: Espectro de frecuencias de la cuerda de La (Fuente: violín acústico)

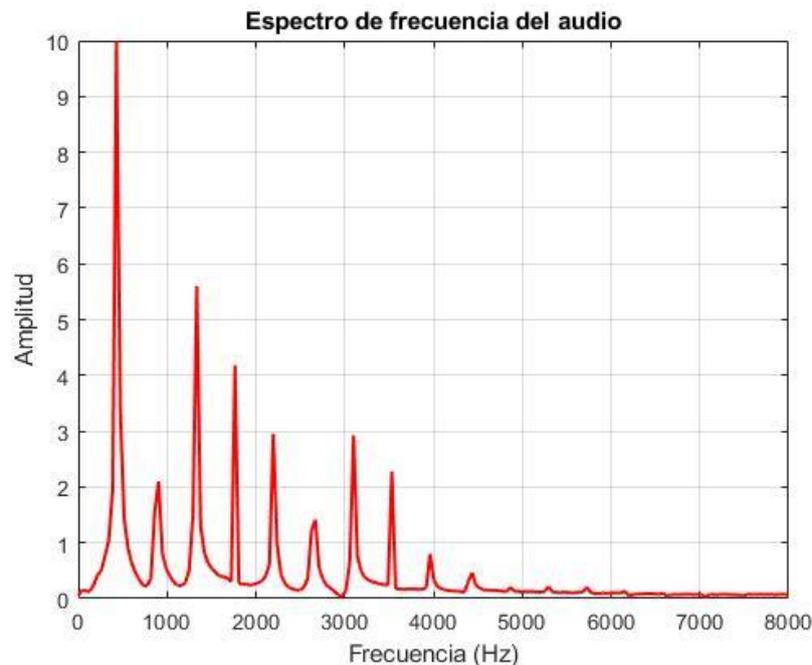


Figura 10.19: Espectro de frecuencias de la cuerda de La (Fuente: violín eléctrico)

- El primer armónico fundamental, de frecuencia igual a 440 Hz es en los dos violines el más pronunciado con diferencia.
- El segundo armónico fundamental, de frecuencia igual a 880 Hz tiene la misma proporción en los dos violines.
- En cambio, el tercer armónico, de frecuencia igual a 1320 Hz es considerablemente mayor en el violín eléctrico en frente del violín acústico.
- El cuarto armónico, de frecuencia igual a 1760 Hz es prácticamente inexistente en la versión acústica del violín, mientras que en la eléctrica tiene un valor que llega hasta los 4 puntos.
- El quinto armónico, de valor 2200 Hz es el segundo mas grande en el violín acústico con un valor de casi 6 puntos sobre 10. En cambio, en el violín eléctrico es prácticamente la mitad del anterior valor, es decir 3 puntos sobre 10.
- El sexto armónico, de valor 2640 Hz, es considerablemente mayor en el violín acústico frente al violín eléctrico.
- A partir de los 3000 Hz se encuentran mayor cantidad de armónicos en el caso del violín acústico, especialmente cuando llega al rango de 4000-7000 Hz. En el caso del violín eléctrico, apenas hay componentes de frecuencia en esos rangos.

Cuerda de MI (659,3Hz):

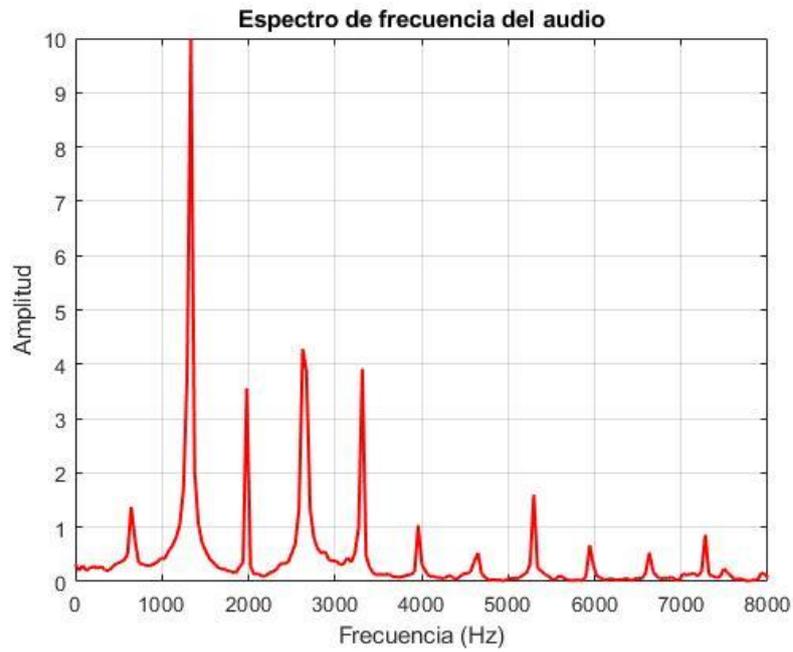


Figura 10.20: Espectro de frecuencias de la cuerda de Mi (Fuente: violín acústico)

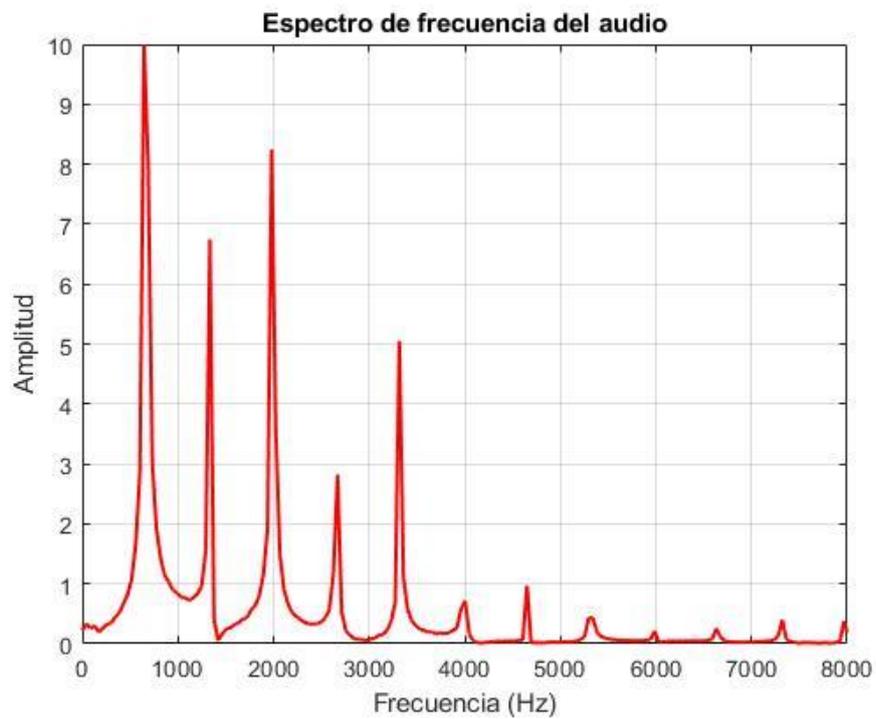


Figura 10.21: Espectro de frecuencias de la cuerda de Mi (Fuente: eléctrico)

- El primer armónico en esta ocasión, con un valor de 659,3 Hz, es el más pronunciado en el caso del violín eléctrico, mientras que en el acústico es de los más pequeños.
- El segundo armónico, de valor 1318,6 Hz, es el más pronunciado en el caso del violín acústico. En el violín eléctrico, tiene un valor de casi 7 puntos sobre 10.
- El tercer armónico, de valor 1977,9 Hz, consigue rebasa los 8 puntos en el violín eléctrico, mientras que en el acústico apenas llega a la mitad.
- El cuarto armónico, de valor 2637,2 Hz, tiene un que rebasa los 4 puntos en el caso del violín acústico, mientras que el violín eléctrico roza por debajo los 3 puntos sobre 10.
- El quinto armónico, de valor 3296,5 Hz consigue llegar a los 5 puntos sobre 10 en el violín eléctrico, mientras que en el acústico apenas llega a los 4 puntos.
- Como es de costumbre, los armónicos siguientes son más pronunciados en el violín acústico y mucho menos perceptibles en el violín eléctrico.

10.4 CONCLUSIONES

Tras haber extraído los datos anteriores saltan a la vista dos gráficas que distan considerablemente entre los dos instrumentos, la cuerda de sol y mi, de 196 y 659,3 Hz respectivamente. En estas dos notas elegidas principalmente porque son cuerdas al aire (que no hace falta poner los dedos por encima) se aprecia que en el violín acústico el primer armónico detectado no es el que más amplitud tiene, sino el segundo en este caso. Esto se debe principalmente al funcionamiento de la caja de resonancia del violín acústico, hueca y construida principalmente de madera, es la que le confiere a este instrumento la capacidad de resonar y amplificar las pequeñas vibraciones originadas en las cuerdas.

Estos resultados también nos revelan diversas diferencias tonales entre los dos instrumentos. En general, en los resultados obtenidos se puede apreciar que las frecuencias con más amplitud en el caso del violín eléctrico suelen ser mas graves. Además, en los espectros de frecuencia del violín acústico también aparecen mayor número de armónicos en las frecuencias agudas y especialmente en la última cuerda, nota Mi (659,3 Hz).

Es importante comentar y reincidir en que cada instrumento es diferente y especialmente en el caso del violín acústico, debido a diferentes factores, entre los que se pueden incluir:

- **Materiales:** Los violines se construyen a base de diferentes tipos de maderas como el abeto y el arce. Su calidad y veteado puede influir considerablemente en el sonido producido.
- **Construcción:** La forma en que se construye un violín puede influir en su sonido. La colocación y tallado preciso de las diferentes partes del violín pueden afectar a su resonancia interna.
- **Barniz:** El barniz aplicado al violín también puede afectar a su sonido. El grosor y composición de este puede afectar en la forma en que vibra la madera y en cómo se proyecta el sonido
- **Historia y uso:** Con el tiempo, los violines pueden desarrollar su propio carácter tonal debido uso continuo y desgaste. Algunos violines antiguos pueden tener un sonido distintivo debido a su historia y a las manos que los han tocado. Es el caso de los conocidos Stradivarius, muy apreciados por coleccionistas y profesionales.

En el caso del violín eléctrico, existen también diversos factores, aunque el más importante es la calidad de la electrónica utilizada. Los transductores, pastillas y sistemas de amplificación serán los que caractericen la respuesta y tono del violín eléctrico.

En resumen, el efecto de resonancia producido en el violín acústico es el que le confiere la diversidad tonal y armónica característica de este instrumento. Su caja de resonancia y componentes, contruidos principalmente de madera, son los responsables de conferirle esta característica, permitiendo así la generación de un mayor número de armónicos y una respuesta más equilibrada en el espectro audible. Por otro lado, el violín eléctrico depende de forma casi total de la electrónica utilizada y el sistema de audio utilizado. Cada uno de estos instrumentos posee características únicas que los hacen adecuados para diferentes estilos de interpretación y contextos.

11. Ecuación

La ecualización se refiere al proceso de ajustar y balancear las diferentes frecuencias de sonido en una mezcla o grabación de audio. Se utiliza para realzar o atenuar determinadas frecuencias, lo que permite mejorar el equilibrio tonal y claridad del sonido.

La ecualización implica la utilización de un ecualizador, que es un dispositivo que se utiliza para controlar la respuesta frecuencial de una señal de audio. Al ajustar esta respuesta frecuencial, se pueden corregir problemas como los ocasionados por resonancias o ruidos indeseados.

En este último apartado se buscará entender y realizar una pequeña ecualización sobre el audio de salida del violín eléctrico. Para ello se hará uso del software libre “Audacity”, que permite grabar y aplicar todo tipo de efectos en cualquier tipo de audio.

Existen diversas configuraciones para ecualizar un instrumento, pero las más simples es el realce de frecuencias graves y agudas.

De forma genérica, se debe aumentar la banda de graves cuando una señal de audio carece de presencia o profundidad en las frecuencias bajas. Esto puede ser útiles para realzar los impactos en una batería o bajo, como también en instrumentos de cuerda. Sin embargo, no se debe exagerar, ya que un exceso de graves puede generar distorsión o hacer que el sonido no sea demasiado perceptible.[16]

En cambio, si se percibe que la señal de audio suena apagada o carente de brillo, se pueden aumentar los agudos. Esto puede ayudar a bajar la nitidez de los instrumentos de alta frecuencia. Al igual que con los graves, no se debe exagerar, ya que puede resultar en un efecto estridente y poco natural.

Es importante recordar que cada instrumento es diferente, por lo que se deben evaluar los ajustes que se deben realizar y utilizar el oído como guía principal en los sutiles cambios que se vayan efectuando.

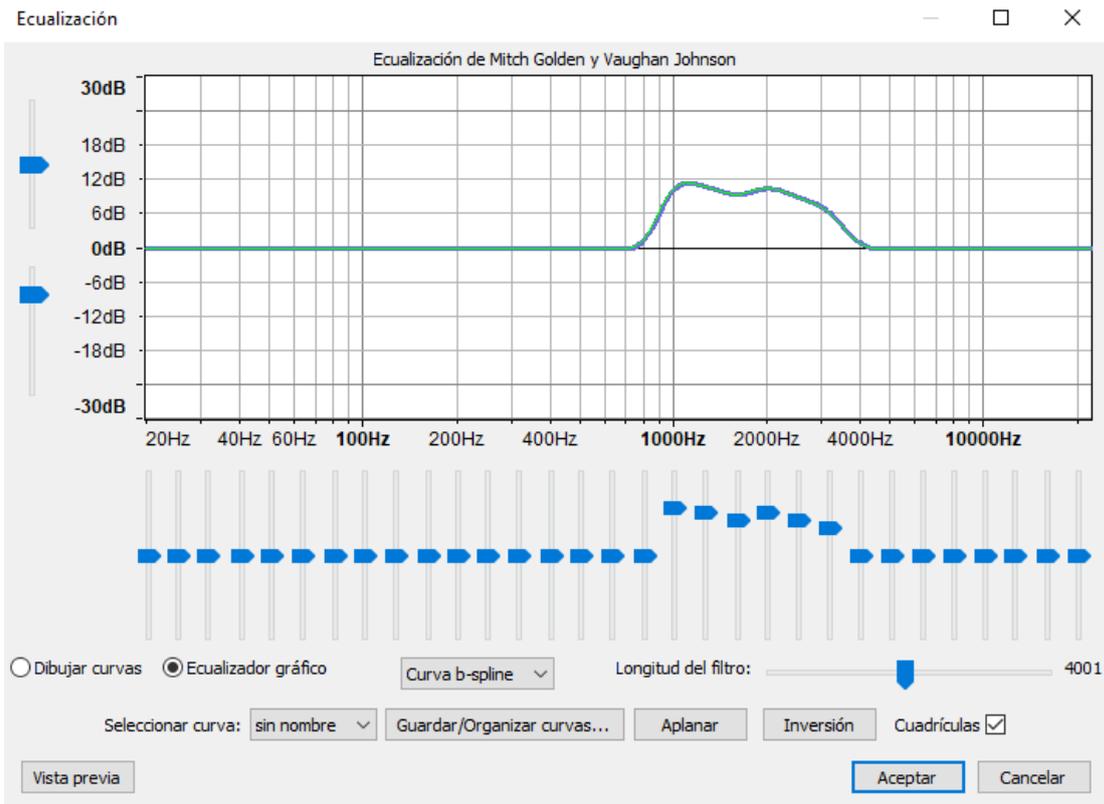


Figura 11.1: Ecuación de agudos en Audacity (Fuente: elaboración propia [2023])

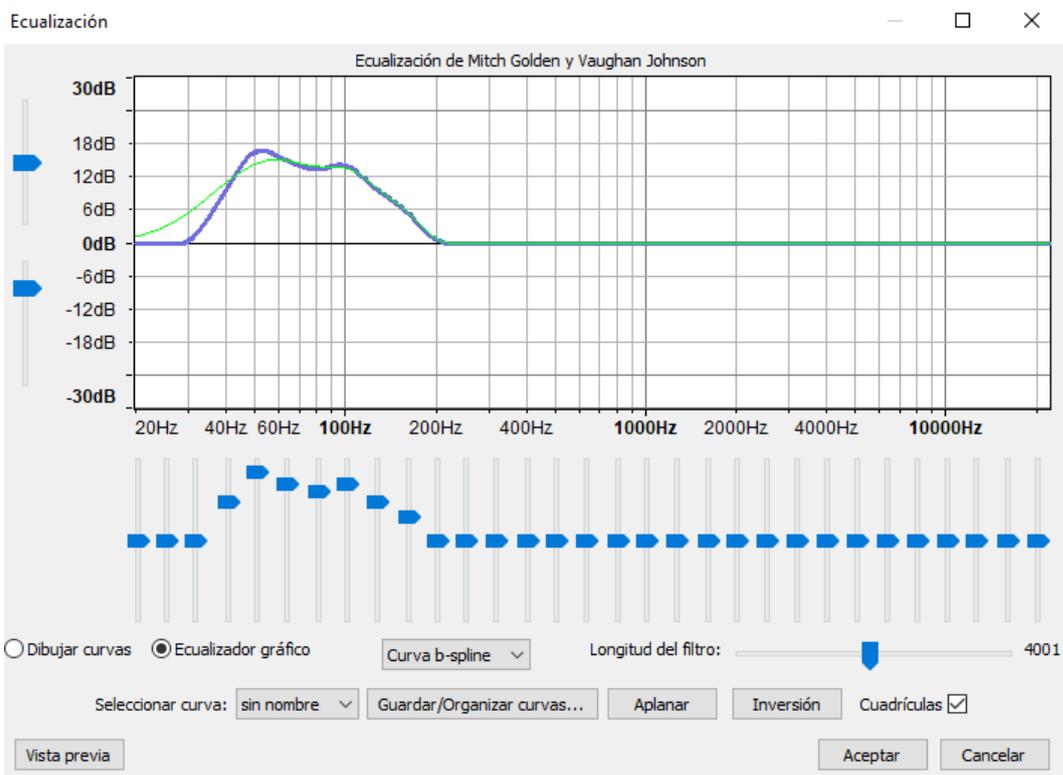


Figura 11.2: Ecuación de graves en Audacity (Fuente: elaboración propia [2023])

12. Conclusiones

A lo largo de este proyecto se ha estudiado el funcionamiento de dos instrumentos muy similares en cuanto a apariencia, pero realmente diferentes si hablamos de la producción de su sonido: el violín acústico tradicional y el violín eléctrico.

El violín acústico es un instrumento que se lleva utilizando desde mediados del siglo XVI y aunque no haya sufrido grandes cambios en cuanto a la producción física del sonido, sí que los ha registrado en cuanto a los materiales de construcción, componentes y perfeccionamiento de la creación de sonido. El sonido de este instrumento se caracteriza por ser muy rico en cuanto a tonalidad se refiere, ya que consigue reproducir una amplia banda de frecuencias debido principalmente a su forma y especialmente a la caja de resonancia formada por las tapas del instrumento que, construidas exclusivamente de madera, le dotan de gran amplificación del sonido generado por las cuerdas originalmente. Existen diversos factores que pueden afectar al sonido de este instrumento tan característico, como el veteado de la madera utilizada y su dirección en el instrumento, los materiales utilizados, la composición química del barniz en la superficie del instrumento y por supuesto el condicionamiento del medio donde se reproduce el sonido, ya que este puede interactuar con las paredes absorbiendo o reflejando ciertas frecuencias. Ningún violín es igual entre sí. Incluso entre dos violines contruidos por la misma persona y con los mismos materiales, cualquier mínimo cambio en el tamaño o peso del instrumento puede influir enormemente en el sonido producido.

El violín eléctrico nació de la necesidad de proyectar el sonido del instrumento en grandes espacios, ya que el violín acústico no se caracteriza de poseer gran potencia. Con los avances tecnológicos de estos últimos años se ha podido recrear y asemejar el sonido del instrumento original, pero con las ventajas que nos brinda la electrónica. La producción del sonido del violín eléctrico empieza en la vibración de las cuerdas, para que, mediante un transductor piezoeléctrico se envíe esta señal al correspondiente sistema de audio para poder amplificarse. La característica armónica del violín eléctrico es definitivamente más pobre que la de su hermano, por lo que el sistema integrado de pastilla piezoeléctrico generalmente suple estas deficiencias con ciertos armónicos artificiales.

La elección entre uno y otro dependerá del uso que se le espera dar y de las necesidades específicas del intérprete. Ambos instrumentos presentan características distintas que los hacen adecuados para diferentes situaciones.

El violín acústico, con su diseño clásico y construcción tradicional, está diseñado para producir un sonido acústico natural y resonante. Su caja de resonancia, construida con maderas de calidad, permite que el sonido se proyecte sin necesidad de amplificación adicional. Esto hace que sea ideal para entornos como auditorios o salas de conciertos donde las condiciones acústicas son óptimas y se busca una experiencia musical auténtica y cálida. Además, el violín acústico ofrece una amplia gama de tonalidades y expresividad, permitiendo al que lo interpreta transmitir emociones y matices.

Por otro lado, el violín eléctrico se ha desarrollado para adaptarse a las necesidades de la música moderna y amplificada. Está equipado con pastillas piezoeléctricas que envían la señal. Esta señal puede ser amplificada y procesada a través del sistema de audio correspondiente, lo que permite al intérprete alcanzar volúmenes altos sin comprometer la calidad del sonido. En entornos ruidosos o en grabaciones de audio también es sumamente útil.

En conclusión, el violín acústico, pese a la moderada potencia, destaca por su riqueza tonal y expresividad en entornos cerrados como auditorios y salas, especialmente para un público con conocimiento musical. En cambio, si lo que se busca es una mayor potencia, ecualización y control del audio, y un espectáculo impactante, aunque se sacrifique cierta calidad tonal, el violín eléctrico se posiciona como la opción ganadora. En última instancia, la elección dependerá de las necesidades y preferencias del intérprete, así como del contexto en el que se vaya a utilizar el instrumento.

13. Bibliografía

- [1] «Breve historia de la música y su influencia en la sociedad desde la prehistoria». <https://www.homohominisacrares.net/artes-literatura/historia-musica-influencia-sociedad.php> (accedido 5 de julio de 2023).
- [2] «Clasificación Sachs-Hornbostel de instrumentos musicales: una revisión y aplicación desde la perspectiva americana». https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0716-27902013000100003 (accedido 5 de julio de 2023).
- [3] J. P. De Arce y F. Gili, «Clasificación Sachs-Hornbostel de instrumentos musicales: una revisión y aplicación desde la perspectiva americana», *Revista musical chilena*, vol. 67, n.º 219, pp. 42-80, 2013, doi: 10.4067/S0716-27902013000100003.
- [4] «Apuntes de Fonética - III». <https://paginaspersonales.deusto.es/airibar/fonetica/apuntes/03.html> (accedido 5 de julio de 2023).
- [5] «El violín: primer instrumento perfecto».
- [6] «(PDF) Luthería electrónica: origen y primeros instrumentos». https://www.researchgate.net/publication/335679785_Lutheria_electronica_origen_y_primeros_instrumentos (accedido 5 de julio de 2023).
- [7] A. Stapleton *et al.*, «The direct piezoelectric effect in the globular protein lysozyme», *Appl Phys Lett*, vol. 111, n.º 14, oct. 2017, doi: 10.1063/1.4997446.
- [8] E. S. Terradillos, J. Pérez Sáez, E. Gil, y C. Sañudo, «FISIOLOGÍA AUDITIVA».
- [9] D. R. Jorge, C. Letelier, D. R. José, y S. Martín, «PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE ESCUELA DE MEDICINA Anatomía y Fisiología del oído».
- [10] «Funcionamiento de la Cóclea | Cochlea». <http://www.cochlea.eu/es/cochlea/funcionamiento> (accedido 5 de julio de 2023).
- [11] J. M. Merino de la Fuente y L. Muñoz-Repiso, «La percepción acústica: física de la audición», *Revista de ciencias, ISSN-e 2255-5943, N.º 2 (junio), 2013, págs. 19-26, n.º 2*, pp. 19-26, 2013, Accedido: 5 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4293906>
- [12] «La percepción acústica: física de la audición - Dialnet». <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4293906> (accedido 5 de julio de 2023).
- [13] «Jugando con la psicoacústica (II): Fletcher-Munson | Hispasonic». <https://www.hispasonic.com/reportajes/jugando-psicoacustica-ii-fletcher-munson/40662> (accedido 5 de julio de 2023).
- [14] «Vista de Modelos psicoacústicos en compresión de audio con transformada Wavelet.» <http://revistas.usbbog.edu.co/index.php/Ingenium/article/view/1284/1075> (accedido 5 de julio de 2023).

- [15] «Nueva Generación de Instrumentos Musicales Electrónicos - ACUSMATICA». <https://www.acusmatica.net/nueva-generacion-instrumentos-electronicos/> (accedido 5 de julio de 2023).
- [16] «Guía de EQ: Cómo usar un instrumento en el espectro de frecuencias [Infografía] | LANDR Blog». <https://blog.landr.com/es/guia-de-eq-como-usar-un-instrumento-en-el-espectro-de-frecuencias-infografia/> (accedido 5 de julio de 2023).