



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
COLEGIO DE INGENIERÍA EN MATERIALES



***Efecto del Material de Fabricación en las
Propiedades Sonoras de Cuerdas de Bajo Eléctrico
Comerciales***

T E S I N A

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADO EN INGENIERÍA EN MATERIALES

PRESENTA:
DANIEL RAMÍREZ GONZÁLEZ

MATRÍCULA:
201501910

DIRECTOR DE TESINA:
DR. ALEJANDRO ESCOBEDO MORALES

PUEBLA, PUE

MARZO 2024

Agradecimientos

Agradezco a cada una de las personas que han pasado a lo largo de mi vida a dejar una enseñanza, por más grande o pequeña que fuese.

A mis padres, por darme las herramientas para enfrentar a cada dificultad. A mi padre, por enseñarme que con un poco de perseverancia y deseo de triunfar, nada es imposible. A mi madre, por enseñarme que hasta en las montañas más altas siempre habrá una mano que te ayude a subir.

A mis hermanos, Toño, Angie, Tere y Gabo por recorrer el camino antes que yo, ser siempre mi apoyo para no caer en los mismos baches, y dejarme inventar los propios.

A Selene, a Alo, a Carlos, a Connor y Blair, que han confiado en cada loca idea y me han apoyado a no dejar de creer.

Al Doctor Escobedo, por abrirme las puertas de su asesoría y tutoría, y, sobre todo, aclarar el panorama de hacia dónde enfocar la brújula profesional.

A Jerry, por darme el espacio y las oportunidades para conocer un mundo que creía imposible de recorrer.

A Oscar, por guiarme por los caminos más oscuros, y enseñarme a construir mi propia linterna.

A los que están, a los que ya no están. A los mencionados y a los omitidos. A los que se fueron y a los que llegarán. A los eternos y a los pasajeros. A todos, gracias por confiar.

A la vida, gracias por una nueva meseta.

INTRODUCCIÓN	5
CAPITULO I. ANTECEDENTES	7
1.1 <i>Ondas de Sonido</i>	7
1.1.1 Amplitud.....	8
1.1.2 Decibeles	9
1.1.3 Frecuencia	10
1.1.4 Armónicos.....	10
1.1.5 Teoría Musical	11
1.2 <i>El Bajo Eléctrico</i>	11
1.3 <i>Cuerdas</i>	13
1.3.1 Núcleo	13
1.3.2 Calibre	14
1.3.3 Entorchado	14
1.3.4 Materiales	15
1.4 <i>Audio Digital</i>	15
1.4.1 Conversión Analógica-Digital	16
1.4.2 Transformada de Fourier Rápida	16
1.4.3 Interfaz de audio	17
1.4.4 Estaciones de Trabajo Digital	17
1.5 <i>Antecedentes Históricos</i>	18
CAPITULO II. METODOLOGIA	20
2.1 <i>Metodología DMAIC</i>	20
2.2 <i>Materiales</i>	21
2.3 <i>Adquisición y análisis de datos</i>	22
2.3.1 Normalidad	23
2.4 <i>Obtención de datos</i>	23
CAPITULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
3.1 <i>Normalidad</i>	26
3.2 <i>Análisis global</i>	26
3.3 <i>Análisis particular</i>	27
3.3.1 Frecuencia fundamental (55 Hz)	27
3.3.2 Graves bajos (110 Hz - 400 Hz)	28
3.3.3 Medios Graves (440 Hz - 1000 Hz)	29
3.3.4 Medios Agudos (1000 Hz – 3000 Hz).....	30
3.3.5 Agudos (3000-Hz – 5000 Hz)	31

3.4 <i>Respecto a la publicidad de las cuerdas de cobalto</i>	33
CONCLUSIONES	35
BIBLIOGRAFÍA	36

INTRODUCCIÓN

La música es una creación humana que participa en una parte importante de la actividad social. A lo largo del tiempo, ésta se ha ido desarrollando, siendo influenciada por diferentes aspectos sociales y tecnológicos, donde el objetivo último siempre ha sido una mejor transmisión de lo que el intérprete quiere proyectar hacia el escucha. La calidad del sonido es un componente crítico que influye de manera significativa en la apreciación y ejecución musical. Los factores que influyen en las características del sonido suelen ser diversos, tanto del lado humano o interprete, como del instrumento empleado. En el caso de los instrumentos, los materiales con los que se fabrica cada componente de un instrumento juegan un papel esencial en el sonido producido. En el caso de los instrumentos de cuerda, los músicos, aficionados y profesionales valoran la capacidad de las cuerdas musicales para producir un sonido armónico, agradable y acorde a las demandas específicas del género musical que se interprete. Sin embargo, en muchos casos, las personas adentradas en el ámbito musical suelen atribuir al sonido características subjetivas como brillo, nitidez, color, metálico, entre otras, sin tener claro la parte física o acústica de donde provienen las mismas. Así, los usuarios pueden atribuir estas características a diferentes factores, pero generalmente entre estos no figura el tipo de material de fabricación de cuerdas, siendo este una de las variables preponderantes del mercado. Esta práctica ha llevado a que los músicos elijan sus cuerdas basándose en suposiciones, en la recomendación de otros músicos o simplemente de manera empírica probando con diferentes materiales, en lugar de contar con datos objetivos respaldados por investigaciones técnico-científicas. Bajo este panorama, es importante abordar cuantitativamente la relación entre el tipo de material de fabricación de las cuerdas, las características del sonido que éstas producen y el valor con el que está relacionado. La necesidad de comprender esta relación radica en proporcionar a los involucrados en la industria musical información basada en evidencia científica que les apoye en la toma de decisión de la clase de cuerdas musicales a utilizar en función del sonido buscado. Además, se espera que esta investigación contribuya a llenar el vacío de conocimiento teórico en la comunidad musical, brindando una base sólida para la optimización de la calidad sonora en la interpretación y producción musical.

El objetivo de esta investigación es estudiar el sonido producido por cuerdas de bajo eléctrico comerciales fabricadas con diferentes materiales: acero inoxidable,

níquel y cobalto. Para ello, se analizó y comparó el espectro de frecuencias que cada una produce dentro del rango audible (20 Hz – 20,000 Hz) con la finalidad de asociar y cuantificar las características subjetivas mencionadas por los usuarios. Aunque este estudio no considera la variable del tiempo, es importante mencionar que una cuerda sujeta a desgaste por corrosión, suciedad u otros factores vinculados al uso continuo [1] [2] puede brindar mayor conocimiento sobre sus propiedades sonoras. Si bien esta investigación va enfocada específicamente a cuerdas de bajo comerciales, los resultados pueden extrapolarse a cuerdas de guitarra u otros instrumentos.

Por último, este escrito invita a la comunidad musical a introducirse en la física, acústica y, en general, al conocimiento científico relacionado a las variables que influyen en un instrumento, brindando un mayor control sobre el sonido que se busca producir, en el saber por qué la música suena como se percibe y descubrir que, aunque la música “se siente”, ese sentimiento tiene un por qué.

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

Para poder entender el sonido que genera un bajo eléctrico, es necesario conocer la teoría que está relacionada. La música se compone por varios aspectos físicos, acústicos, técnicos, y digitales. Cada uno se enfoca en las preguntas más básicas que surgen al estudiar la problemática previamente descrita. En este capítulo, a base de extractos bibliográficos y electrónicos, se responde a cuestiones como, ¿qué es el sonido?, ¿cómo se construye la música?, ¿Cuáles son las partes que componen a un bajo y a las cuerdas?, y ¿cómo el sonido producido por un bajo puede transportarse a un dispositivo digital? También, se analizan las investigaciones previas que estén relacionadas a variables que influyen en el sonido de un bajo eléctrico

1.1 Ondas de Sonido

Bajo condiciones normales, el sonido es un fenómeno físico que se puede experimentar en todo momento. Este facilita la comunicación de los individuos de una la sociedad. La Universidad de Iowa [3] define al sonido de la siguiente manera: “Una perturbación de presión que se mueve a través de un medio elástico en forma de ondas mecánicas. Cuando se ejerce una fuerza sobre un átomo, este se desplaza de su posición de equilibrio y ejerce una fuerza sobre los átomos adyacentes, los cuales a su vez se mueven de su posición de reposo. Esta sucesión de movimiento continúa a través del medio. Así, el sonido viaja a través de un medio debido a la transferencia de energía de un átomo o partícula a uno adyacente”.

Las ondas de sonido comparten una característica con otro tipo de ondas, como las electromagnéticas y las de superficies líquidas: son perturbaciones físicas que se producen en un punto del espacio, propagándose por el espacio. Cuando las ondas sonoras se despliegan, el aire transmite movimiento a través de capas sucesivas de aire. Este fenómeno propaga las ondas sonoras en el aire, representando ésta como una envolvente. A medida que la onda avanza desde la fuente de perturbación, las distintas capas de aire experimentan compresión y descompresión, donde cada molécula de aire se mueve ligeramente hacia adelante y hacia atrás. Por ejemplo, una cuerda vibrante genera una secuencia de capas de compresión que se expanden. Si la cuerda vibra con la suficiente frecuencia y amplitud es posible percibir la sucesión de estas capas como un tono audible [4].

Existen dos tipos de movimiento ondulatorio: el longitudinal y el transversal. Las ondas longitudinales se caracterizan por desplazamientos en la misma dirección de propagación de la onda, mientras que las ondas transversales muestran oscilaciones perpendiculares a la dirección de propagación. Ejemplos de ondas transversales son las producidas en una guitarra o las ondas electromagnéticas (e.g. la luz visible). Las cuerdas de guitarra y las ondas en la superficie del agua vibran en una dirección específica formando un frente de onda, por lo que se clasifican como ondas planas [5].

El estudio de las cualidades de las ondas es fundamental para la comprensión del fenómeno de propagación del sonido en el aire o a través de otros medios materiales. Las ondas se caracterizan y diferencian entre sí por su frecuencia, amplitud y longitud de onda (ver Figura 1). Estas características de la onda de sonido están relacionadas con la percepción del tono, volumen y calidad del sonido [3].

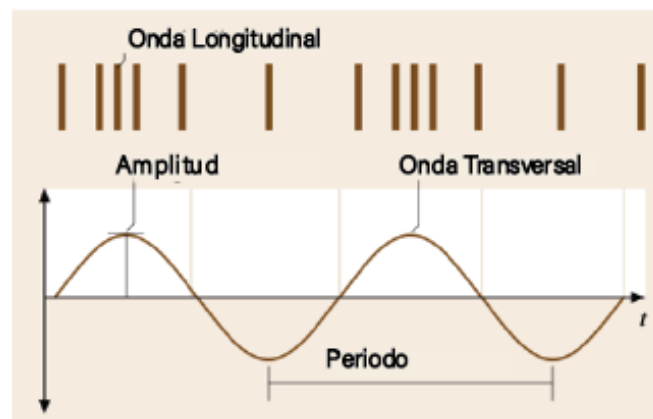


Figura 1. Esquema de ondas longitudinales y transversales. [6]

1.1.1 Amplitud

La amplitud en el contexto del sonido se relaciona con la magnitud de la variación de presión experimentada por las partículas del medio donde este se transmite. Esta magnitud corresponde con la percepción del volumen del sonido, donde una amplitud mayor se traduce en un sonido más fuerte o intenso [7]. La amplitud de la onda está relacionada con la cantidad de energía que ésta propaga [3]. Cuanto mayor sea la amplitud más energía posee la onda. Es importante diferenciar la amplitud de la intensidad en una onda. Si bien, al incrementar la amplitud también lo hace la intensidad, esta última refiere a la cantidad de energía que transmite la onda sonora por unidad de área. La intensidad se mide en decibeles.

1.1.2 Decibeles

El oído humano puede percibir presiones acústicas en un rango de 20 μPa - 200 Pa. Debido a que el rango de presiones acústicas típicas es grande, es conveniente trabajar con una escala de medición relativa en lugar de una escala de medición absoluta, esto es, se utiliza una escala logarítmica. Así, la escala de intensidad del sonido se define de modo que cada aumento en un factor de diez en la cantidad de energía transportada por la onda se representa como un cambio de 1 bel. No obstante, el bel también se vuelve demasiado grande para ser utilizado. Por eso se utiliza la escala de decibelios (1/10 bel) [8].

Los decibeles normalmente comparan el ratio de dos intensidades que describen a la potencia acústica, potencia eléctrica y nivel de presión sonora, I_1 e I_2 , las cuales varían por varios ordenes de magnitud. La ecuación utilizada es la siguiente:

$$\Delta I(\text{dB}) = 10 \log \frac{I_2}{I_1} \quad (1)$$

Debido a que el sonido son ondas de presión, la intensidad sonora no es directamente medida. En cambio, suele tomarse la medición de las variaciones de presión como la forma más eficiente.

La potencia transportada por una onda es proporcional al cuadrado de la amplitud. Por lo tanto, la ecuación utilizada para cuantificar la diferencia de intensidad sonora basada en una diferencia medida de presión sonora se expresa como:

$$\Delta I(\text{dB}) = 10 \log \frac{I_2}{I_1} = 10 \log \frac{P_2^2}{P_1^2} = 20 \log \frac{P_2}{P_1} \quad (2)$$

En el ámbito de la música digital, la mayoría de los dispositivos como micrófonos producen un voltaje que es proporcional a la presión sonora, entonces la ecuación del cambio en la intensidad del sonido se interpreta como:

$$\Delta I(\text{dB}) = 20 \log \frac{V_2}{V_1} \quad (3)$$

donde ΔI es la variación de la intensidad sonora incidente en el transductor, y V_1 y V_2 son los voltajes de salida del transductor [3] [6].

1.1.3 Frecuencia

La frecuencia es el número de ciclos que un objeto oscila alrededor de su posición de equilibrio por unidad de tiempo individual vibra en un tiempo determinado (un segundo), es decir, las veces que una onda pasa por un punto determinado en una unidad de tiempo. La frecuencia se mide en Hertz (Hz), donde un Hz es equivalente a un ciclo por segundo. De modo que, un Hz equivale a un ciclo de compresión-descompresión por segundo.

El tono es una cualidad del sonido que depende directamente de la frecuencia de la onda sonora. Esta característica permite la distinción entre un sonido grave o agudo. Los sonidos agudos tienen frecuencias altas, mientras que los sonidos graves tienen frecuencias bajas. Por ejemplo, un trueno tiene una frecuencia de tan sólo 50 Hz, en tanto que un silbido puede alcanzar una frecuencia de 1000 Hz. El oído humano percibe sonidos con frecuencias de 20 Hz a 20000 Hz. Aunque, conforme el ser humano envejece, este rango se reduce notablemente [3] [7].

Existen diversos factores que influyen en la frecuencia producida por las cuerdas de instrumentos musicales, entre estos: i) longitud, cuerdas más cortas dan frecuencias más altas; ii) diámetro, grosores mayores hacen vibrar más lento a las cuerdas, produciendo frecuencias bajas; iii) tensión mecánica, las cuerdas son sostenidas entre dos puntos, estirarlas provoca tensión en ellas, reduciendo su diámetro e incrementando su frecuencia de vibración, aflojarlas resulta en el efecto contrario; iv) densidad, las cuerdas utilizadas para frecuencias graves tienden a utilizar materiales más densos [3].

1.1.4 Armónicos

Cuando una fuente de sonido vibra, lo hace produciendo diferentes frecuencias a la vez, sin importar que cada una esté tocando la misma nota. La combinación de las ondas de distintas frecuencias es lo que confiere el timbre de cada fuente o instrumento. Cuando una cuerda vibra, lo que se escucha es la frecuencia más baja, llamada fundamental (f_1). Los siguientes modos de vibración que oscilan a frecuencias superiores respecto a la fundamental se denominan armónicos ($f_2, f_3, f_4...f_n$). La frecuencia de los armónicos se caracteriza por ser múltiplos enteros de la fundamental (nf_1).

1.1.5 Teoría musical

Si bien, este trabajo no tiene por objetivo el estudio de la teoría musical, es importante para su propósito exponer las características de las notas musicales en el marco de las ondas acústicas. En la música occidental, la escala utilizada se divide en octavas, con una relación de frecuencia 2:1. Luego, a su vez cada octava se subdivide en 12 intervalos. Las notas dentro de una octava están relacionadas entre sí por relaciones matemáticas de frecuencias, correspondiendo la frecuencia fundamental a la nota más grave. Por ejemplo, en el caso del piano, la nota más grave es un Do (C) y la nota de Sol (G) tiene aproximadamente 1.5 veces la frecuencia de C dentro de la misma octava. La misma relación se repite para las demás octavas y notas [9].

Si se desea calcular la frecuencia de una nota musical específica, se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$f = a \cdot b^x \quad (4)$$

Donde f es la frecuencia de la nota en Hz; a es una constante de proporcionalidad, con un valor de 15.4338; b es la base de la escala relacionada con el intervalo musical utilizado, para la escala temperada occidental se elige generalmente la doceava raíz cuadrada de 2 (1.05946); y x es la posición de la nota en la escala. En la Tabla 1 se presentan las frecuencias para las primeras diez octavas de cada nota [10].

Tabla 1. Lista de las frecuencias de cada nota entre el 1 al 120 para la escala occidental [9].

	Frecuencia (Hz)									
C	16.352	32.703	65.406	130.813	261.625	523.251	1046.502	2093.005	4186.009	8372.018
C#	17.324	34.648	69.296	138.591	277.183	554.365	1108.731	2217.461	4434.922	8869.844
D	18.354	36.708	73.416	1468.320	293.665	587.330	1174.659	2349.318	4698.636	9397.272
D#	19.445	38.891	77.782	155.564	311.127	622.254	1244.508	2489.016	4978.032	9956.063
E	20.602	41.203	82.407	164.814	329.628	659.255	1318.510	2637.021	5274.041	10548.081
F	21.827	43.654	87.307	174.614	349.228	698.457	1396.913	2793.826	5587.652	11117.303
F#	23.125	46.249	92.499	184.997	369.994	739.989	1479.978	2959.956	5919.911	11839.821
G	24.500	48.999	97.999	195.998	391.996	783.991	1567.982	3135.964	6271.927	12543.853
G#	25.957	51.913	103.826	207.652	415.305	830.609	1661.219	3322.438	6644.875	13289.750
A	27.500	55.000	110.000	220.000	440.000	880.000	1760.000	3520.000	7040.000	14079.999
A#	29.135	58.270	116.541	233.082	466.164	932.328	1864.655	3729.310	7458.620	14917.239
B	30.868	61.735	123.471	246.942	493.883	987.767	1975.533	3951.067	7902.133	15804.265

1.2 El Bajo Eléctrico

En términos generales, un bajo eléctrico es similar a una guitarra eléctrica, aunque tiene diferente funcionalidad. Este es un instrumento musical de cuerdas que genera sonido en el rango de frecuencias bajas. Normalmente estos instrumentos se pueden

encontrar de cuatro, cinco o hasta seis cuerdas, siendo los más comunes los de cuatro cuerdas. La afinación estándar de estos instrumentos se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Afinación estándar de un bajo de cuatro cuerdas [9].

Cuerda #	Nota	Frecuencia (Hz)
4	E	41.20
3	A	55.00
2	D	43.42
1	G	98.00

Los bajos y guitarras eléctricas cuentan con pastillas electromagnéticas (*pickups*), aunque también se suelen utilizar pastillas piezoeléctricas u ópticas. Estos dispositivos convierten las vibraciones de las cuerdas en una señal eléctrica (transductor), para luego ser amplificada mediante un altavoz. En la Figura 2 se presentan los componentes de un bajo eléctrico típico.

Las pastillas electromagnéticas se componen por una bobina con un núcleo magnético. Al vibrar la cuerda, ésta produce variaciones en el flujo magnético del núcleo, produciendo una señal eléctrica por medio de la bobina. Los bajos eléctricos suelen tener dos pastillas, aunque también se pueden encontrar con combinaciones de una, tres u otro tipo [11].

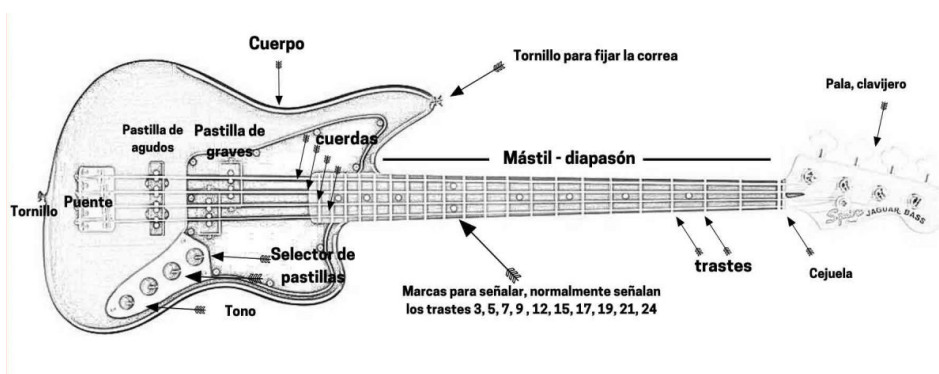


Figura 2. Diagrama de las partes de un bajo eléctrico estándar [12].

Las características sonoras subjetivas normalmente están relacionadas a un rango de frecuencias, que varía según de la fuente que se consulte. Esta información se suele encontrar en libros o foros de mezcla de audio. En la Tabla 3 se presenta la

estimación de I. Alonso [13] respecto a los rangos frecuencias y las características subjetivas que estas aportan al sonido.

Tabla 3. Rangos frecuenciales de bajo eléctrico con las respectivas características sonoras

Rango de frecuencias (Hz)	Característica sonora
0 - 35	No contiene información útil
40 - 200	Frecuencias fundamentales
200 - 400	Bajo emborronado
550 - 900	Pegada, ataque o golpe
1000 - 2500	Articulación, claridad y brillo. Adicionalmente, posee el sonido de la púa o los dedos con las cuerdas

1.3 Cuerdas

Las cuerdas en guitarras acústicas y contrabajos clásicos frecuentemente están hechas de nylon; en el pasado solían hacerse de tripas de animales. Sin embargo, para que las pastillas puedan captar un pulso magnético, las cuerdas de guitarras y bajos eléctricos están hechas de un material metálico.

Hay información empírica sobre el efecto de cada variable en el sonido que producen, la mayoría de ésta se recolectó en foros de internet o páginas especializadas en producción musical y mezcla. En los siguientes apartados se abordan las características más relevantes dentro de las cuerdas de bajo comerciales [14].

1.3.1 Núcleo

El núcleo es el material interno que determina la longitud de la cuerda, su forma y grosor brinda cualidades específicas al sonido producido (ver Figura 3). Hay dos tipos de núcleos en las cuerdas comerciales [15]:

1. Circular (*Roundcore*). Este consiste en un núcleo de sección circular regular, pero estrecho, como el usado en las bobinas. Es un método de manufactura antiguo que se caracteriza por tener un mayor contacto con el material que se embobina alrededor del núcleo (entorchado).
2. Hexagonal (*Hexcore*). Este consiste en un alambre con núcleo en forma hexagonal. El diseño hexagonal evita que el entorchado se deslice sobre este,

dando una mayor estabilidad y flexibilidad para afinar. Asimismo, este tipo de conformado reduce la rotura del núcleo, en comparación con el núcleo circular.

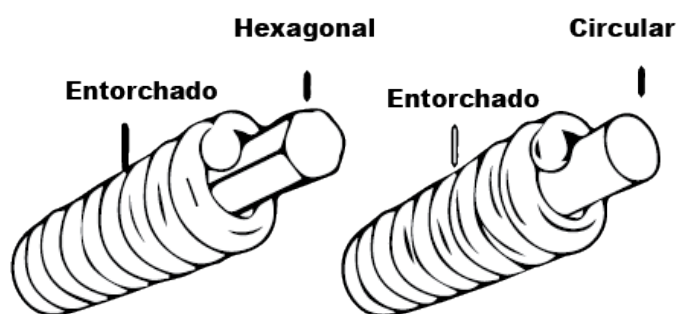


Figura 3. Tipos de núcleo para cuerdas de bajo comerciales. Hexagonal (Hexcore) y circular (Roundcore) [16].

1.3.2 Calibre

El calibre se refiere al diámetro del núcleo de la cuerda. Este se especifica en milésimas de pulgada (e.g. 0.04 in) o simplemente el número correspondiente (e.g. 40). Cada cuerda tiene un rango de calibres, por ejemplo, la primera cuerda (G) puede tener un calibre de 30 hasta 55. El conjunto de calibres más común para las cuatro cuerdas de bajo eléctrico es 40-60-80-100. La característica que aporta el calibre de la cuerda, según S. Revuelta de la Peña es [14]:

- Mayor calibre corresponde a mayor resistencia a la tensión, mayor volumen y un sonido más sostenido, pero menor definición.
- Menor calibre resulta en menor resistencia a la tensión, más brillo, nitidez y comodidad, pero un menor volumen.

1.3.3 Entorchado

El entorchado es el cable que se embobina alrededor del núcleo. Su función es la de proteger al núcleo de la humedad y darle mayor resistencia mecánica. También sirve para aumentar la masa, y por tanto las frecuencias de resonancia de la cuerda. Los tipos de entorchado que se encuentran comúnmente en el mercado son tres: redondo (*round wound*), semi-redondo (*half round*) y plano (*flat wound*) (ver Figura 4). También se pueden encontrar entorchados de Nylon (*tape wound*), pero no son comunes.

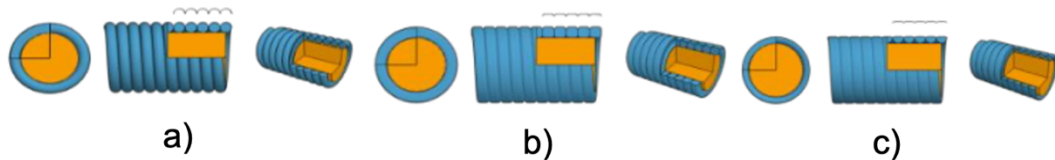


Figura 4. Diferentes tipos de bobinado: a) Redondo, b) Semiplano y c) Plano. Obtenido de [15]

Respecto a las características principales de los entorchados comerciales se puede mencionar lo siguiente:

- Redondo: es el más común, tacto rugoso y con sonido brillante y más sostenido.
- Semiplano: muy poco utilizado. Con sonido más brillante y tacto suave.
- Plano: revestimiento prácticamente liso que aporta un sonido suave y oscuro.

1.3.4 Materiales

El objetivo de esta investigación se basa en comparar el sonido que produce una cuerda de bajo eléctrico en función del material de fabricación. Con respecto a los núcleos, estos se fabrican en acero inoxidable o estaño. Aunque, para instrumentos acústicos aún se pueden encontrar núcleos de nylon o inclusive seda.

De acuerdo con Revuelta de la Peña [14], las características sonoras que presentan las cuerdas de bajo a razón del material de fabricación del entorchado son:

- Acero niquelado: sonido suave y equilibrado
- Acero inoxidable: sonido brillante y definido
- Cobalto: brillante, nítido y con mayor volumen

En el caso de cuerdas con entorchado de cobalto, éstas son un producto relativamente nuevo en el mercado fabricado y distribuido por la empresa Ernie Ball Strings. Su mayor peculiaridad es que se anuncia como una cuerda con un mayor volumen de salida y alta respuesta de frecuencias [17].

1.4. Audio Digital

El audio digital ha transformado la manera en que se crea, procesa y reproduce el sonido. A diferencia del audio analógico, que representa al sonido como una señal continua y variable en el tiempo, el audio digital lo representa como una serie de valores discretos. El uso del audio digital presenta ciertas ventajas, como lo son la

facilidad de procesamiento, versatilidad para manipularlo, y una mayor precisión en la captura y disminución de ruido o distorsión.

1.4.1 Conversión analógica-digital

La conversión analógica-digital (ADC) es el proceso mediante el cual una señal de audio continua en el tiempo (analógica) se convierte en una representación discreta (digital) que puede ser procesada y almacenada por un dispositivo digital. Este proceso implica dos etapas principales:

1. Muestreo. El primer paso es tomar muestras de la señal analógica a intervalos regulares de tiempo. La frecuencia de muestreo determina la cantidad de muestras tomadas por segundo y se mide en Hz. La teoría de muestreo establece que, para evitar la pérdida de información, la frecuencia de muestreo debe ser al menos el doble de la frecuencia máxima de la señal analógica (teorema de Nyquist).
2. Cuantificación. Después de muestrear la señal, cada muestra se asigna a un valor discreto en una escala digital. Este proceso se llama cuantificación. La resolución de cuantificación se expresa en bits y determina la precisión con la que cada muestra se representa digitalmente. Mayor número de bits permite una representación más precisa de la información, pero también requiere más espacio de almacenamiento [18].

1.4.2 Transformada de Fourier rápida

La transformada de Fourier rápida (FFT, por sus siglas en inglés) es un algoritmo eficiente para calcular la transformada discreta de Fourier (DFT, por sus siglas en inglés) de una secuencia discreta. En el contexto del procesamiento de audio, la FFT se utiliza para analizar las componentes de frecuencia de una señal digital de sonido. Dada una ecuación discreta $x[n]$ de longitud N , la FFT se determina mediante la siguiente ecuación:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (5)$$

Donde $X[k]$ es la representación en la frecuencia k ; $x[n]$ es la señal de audio discreta en el tiempo n ; y N es la longitud de la secuencia [19].

La FFT se utiliza comúnmente en el análisis de los audios digitales para conocer su composición espectral, esto es, las frecuencias específicas que integran

a la onda de audio. En la práctica, el cálculo numérico se realiza empleando programas computacionales basados en Python o estaciones de trabajo digital comerciales.

1.4.3 Interfaz de audio

En el ámbito de la grabación y reproducción de audio, una interfaz de audio es un dispositivo que actúa como puente entre las señales analógicas y las digitales. Su función principal es convertir las señales analógicas provenientes de micrófonos, instrumentos u otras fuentes de sonido en señales digitales que pueden ser procesadas y almacenadas por una computadora. Además, las interfaces de audio también realizan la conversión inversa, transformando las señales digitales de vuelta a analógicas para su reproducción a través de altavoces o auriculares. Estos dispositivos suelen incorporar preamplificadores de las señales de baja amplitud, ADCs y convertidores digital-analógico (DAC, por sus siglas en inglés) [18]. Un ejemplo de interfaz de audio es la llamada Focusrite Scarlett Solo 2nd. Entre sus características relevantes se pueden mencionar [20]:

- Frecuencia de muestreo (*sample rate*): 44.1 kHz y 48 kHz.
- Profundidad de bits (*bit depth*): 16 o 24 bits, dependiendo de la calidad requerida y del espacio de almacenamiento disponible.
- Preamplificación: ajuste de preamplificadores de micrófono según las necesidades de la señal de entrada para optimizar la relación señal-ruido.

1.4.4 Estaciones de trabajo digital

Las estaciones de trabajo digital (DAWs, por sus siglas en inglés) son paquetería computacional diseñadas para la grabación, edición y producción de música y audio. Esta clase de paquetería está diseñada específicamente para el entorno digital, la creación musical y la modificación del audio mediante algoritmos y procesos matemáticos [21]. WaveLab es una aplicación informática de edición y procesamiento de audio desarrollada por Steinberg [22]. Es una herramienta versátil utilizada ampliamente por profesionales en la industria musical, ingenieros de sonido y productores para realizar tareas como edición, masterización, restauración de audio, entre otras tareas. WaveLab utiliza el método FFT para realizar análisis espectrales detallados de las señales de audio. Los usuarios pueden visualizar la representación gráfica de la distribución de frecuencias a lo largo del tiempo, lo que facilita la

identificación de componentes clave en una grabación. Este análisis espectral es crucial para tareas como detección de problemas de frecuencia, identificación de armónicos y optimización de equilibrio tonal [22].

1.5 Antecedentes Históricos

A pesar de no encontrarse al momento información teórica sobre el efecto del material de fabricación sobre las propiedades sonoras de cuerdas de bajo eléctrico, existen algunas investigaciones en revistas científicas donde se aborda el efecto que tienen los materiales de las partes de una guitarra o bajo eléctricos sobre el sonido que estos producen.

S.-H. Park [23] habla sobre la comparación del sonido en función del material de la púa, espiga o plumilla (objeto con el que se tocan las cuerdas, en lugar de directamente con los dedos). El experimento realizado aborda las variables que influyen a una plumilla, como es el material, dureza o forma. Además, analiza las frecuencias que una guitarra produce al variar el material de la plumilla, con el fin de dar un criterio de selección para los usuarios.

En otro estudio, K. Nishimura [24] estudia el sonido, particularmente el timbre, producido por una guitarra eléctrica dependiendo del material de fabricación de la pastilla electromagnética (*pick-up*), así como el mecanismo de captación de la señal acústica. El autor encontró que, el timbre o calidad de sonido tienen una gran influencia de los componentes del instrumento como el cuerpo, el mástil, la pastilla, los dispositivos eléctricos, etc., pudiendo afectar la calidad de sonido como la prolongación, un sonido claro, la suavidad, etc. Normalmente, los músicos cambian sus guitarras completamente para encontrar un mejor sonido, cuando bien sólo bastaría hacer un cambio del material con el que está fabricado el golpeador (*pick-guard*) para obtener resultados similares. Los materiales empleados fueron madera (MDF, roble), metales no ferrosos (cobre, latón), metales ferrosos (FC, SK5, SS) y polímeros. El estudio propone usar una solución polimérica para lograr una reducción considerable del ruido.

Por último, en un experimento similar realizado en 1979 por H.G. de Dayan y A. Bewar [25], se centró en correlacionar las características acústicas de una cuerda de guitarra con su calidad subjetiva. El estudio se dividió en las propiedades acústicas de las cuerdas y en la evaluación subjetiva de sonido. Para ello, se utilizaron cuatro series de cuerdas de guitarra (seis en cada una) provenientes de fabricantes distintos.

El experimento se realizó empleando un micrófono, un generador de señales, un osciloscopio y otros instrumentos de medición acústica. Asimismo, se menciona un dispositivo mecánico para excitar las cuerdas de forma controlada, permitiendo la comparación de las frecuencias fundamentales y armónicos de las cuerdas de prueba. Luego, las series de cuerdas fueron clasificadas en tipo uno a cuatro, según la calidad percibida. En el estudio se establece que las cuerdas tipo uno y dos brindaron los mejores resultados, mientras que las de tipo cuatro son de menor calidad y precio. En esta investigación la comparación se hizo respecto a los fabricantes de las cuerdas, sin tomar en cuenta los materiales u otras variables que las cuerdas pudiesen presentar.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

La metodología para realizar la presente investigación se dividió en dos partes. La primera, la metodología DMAIC, que describe la manera que se eligieron, recopilaron y analizaron los datos necesarios para comprobar la hipótesis de si el material de una cuerda de bajo (acero inoxidable, níquel y cobalto) hace variar al volumen de las frecuencias producidas al ser perturbada. La segunda metodología, describe la experimental, cómo se obtuvieron los datos mediante un proceso replicable a cada uno de los 3 diferentes materiales de cuerda, y una descripción de todos los materiales utilizados durante todo el experimento.




2.1 Metodología DMAIC

El presente estudio se basó en la metodología conocida como DMAIC por el acrónimo en inglés de las palabras Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar. Esta metodología no sólo se emplea en la industria musical, sino en general en la ingeniería de procesos. DMAIC incluye la recopilación de datos, el análisis estadístico y la aplicación de pruebas de normalidad y pruebas de hipótesis para evaluar diferencias significativas entre grupos o condiciones. La descripción de cada paso de la metodología se presenta a continuación.

- Definir: se establecieron los objetivos y los límites de la investigación. En este caso, identificar y cuantificar un parámetro en la señal espectral que esté asociada a la característica subjetiva de “un buen sonido” para una cuerda de bajo, es decir, establecer una variable dependiente y una independiente. Así, se propuso como parámetro cuantificable dependiente el volumen (dB) a determinada(s) frecuencia(s).
- Medir: se estableció un proceso de medición replicable que permitiera conocer qué tipo de datos se obtienen al buscar medir el volumen en determinada frecuencia. El experimento dio como salida valores de volumen (dB) vs frecuencia (Hz).
- Analizar: se evaluaron los resultados para identificar las variables que pudiesen afectar a la respuesta medida. Para esto, se creó un diagrama de Ishikawa o de causa-efecto en el que se enlistaron y definieron las posibles variables implicadas. De este se identificó el factor de interés (variable independiente).

Coil (Seymour Duncan, California) conectado a una interfaz de audio Scarlett Solo 2nd Gen (Focusrite Audio Engineering Limited, China) a través de un cable genérico Fender Jack TS (Fender Musical Instruments Co., California).

Tabla 4. Características de las cuerdas de bajo eléctrico comerciales seleccionadas en este estudio.

Calibre / Nota	Tipo de núcleo	Tipo de entorchado	Material del entorchado	Marca
80 / A	Circular	Redondo	Acero inoxidable	DR – Hi-Beams 
80 / A	Circular	Redondo	Níquel (acero niquelado)	D'Addario – XLB Nickel 
80 / A	Circular	Redondo	Cobalto	Ernie Ball – Slinky Cobalto 

2.3 Adquisición y Análisis de Datos

Las grabaciones de sonido se realizaron instalando la cuerda de interés en el instrumento arriba descrito. Para lograr una afinación precisa, se recurrió al programa informático Logic Pro-X 10.7 (Apple Inc.), ajustando la frecuencia estándar de la cuerda a 440 Hz. Dado que se trata de cuerdas nuevas con relativa elasticidad, tras tensionar la cuerda se dio un período de tiempo (5 días) para permitir su deformación

inicial. En los casos donde la frecuencia se redujo, se procedió a su tensado y verificó su correcta afinación. Este proceso se repitió iterativamente hasta lograr una afinación (frecuencia) constante y uniforme. Luego, se procedió a hacer las mediciones de sonido. Para ello, se conectó el bajo eléctrico a una interfaz de audio vinculada con el ordenador, manteniendo una ganancia estable. Entonces se registró el sonido generado por la cuerda al ser perturbada individualmente, registrándose la señal durante un período mínimo de 2 s. Las grabaciones de sonido se realizaron empleando el mismo programa Logic Pro-X 10.7.

2.3.1 Normalidad

Para verificar la reproducibilidad de los experimentos realizados, se realizó una prueba de normalidad estadística. Para ello, se aplicó la prueba de Anderson-Darling a 10 valores del volumen registrado a una frecuencia específica (55 Hz) correspondientes al mismo número de experimentos independientes. Para el análisis y comparación de datos se utilizaron los programas MiniTab (Minitab, LLC) y Excel (Microsoft Corporation).

2.4 Obtención de Datos

Los 10 archivos de audio obtenidos por cada cuerda se introdujeron en la paquetería WaveLab Pro-11 (Steinberg Media Technologies GmbH), donde se calculó y exportó la FFT correspondiente a los tres materiales diferentes. Dado que el pico con la ganancia máxima se relaciona con la fuerza aplicada a la cuerda y por tanto la amplitud de vibración, éste se normalizó a un volumen de -6 dB.

Para convertir la magnitud del espectro sonoro adquirido en términos de decibeles, se aplicó la siguiente ecuación a los datos de frecuencia vs magnitud:

$$dB = 20 * \log\left(\frac{Value\ 2}{Value\ 1}\right) \quad (6)$$

donde $\frac{Value\ 2}{Value\ 1}$ está dado en términos de *non-power*, es decir, en términos de voltaje o presión sonora.

La información del espectro FFT para cada experimento fue obtenida en un archivo en formato ASCII, que luego fue desplegado en la paquetería MS-Excel. De entre las frecuencias resueltas, se eligieron aquellas 26 con el volumen más alto (dB) para el desarrollo del análisis. Estas frecuencias fueron las mismas para las diferentes réplicas de cada material.

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la experimentación para los tres tipos de cuerdas consideradas. Además, se discuten cada uno de los resultados con el fin de generar una explicación que responda a la hipótesis de si el material de la cuerda influye directamente en las propiedades sonoras que ésta produce. Con los resultados obtenidos se busca explicar de dónde provienen las propiedades sonoras descritas por usuarios y técnicos respecto a los rangos existentes en una cuerda de bajo.

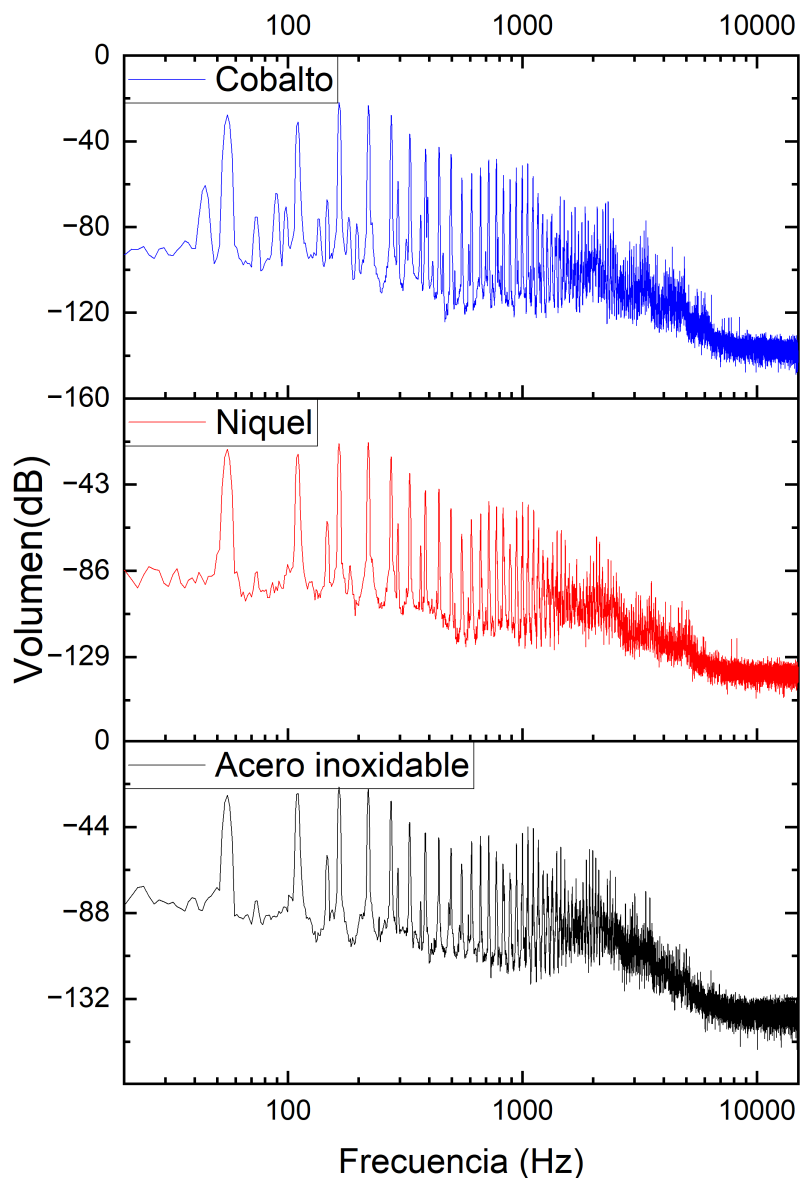


Figura 6. Espectros acústicos (repetición 1) de cuerdas La (A) de bajo eléctrico comerciales (calibre 40) con entorchados de diferente material.

En la Figura 6 se presentan los espectros sonoros característicos de las cuerdas La (A) de bajo eléctrico comerciales (calibre 40) con entorchados de diferente material. Tomando como ejemplo el espectro de la cuerda de níquel, en éste se pueden observar frecuencias acústicas que van desde los 55 Hz hasta 4000 Hz. En la región de baja frecuencia se puede notar que los rangos de volumen de las señales detectadas están alrededor de -24 dB a -48 dB. Luego, conforme la frecuencia aumenta, el volumen disminuye hasta casi -90 dB.

Cabe resaltar que, la mayoría de las frecuencias analizadas corresponden a la nota La (A) en sus diferentes octavas (refiérase a Tabla 1), lo que corrobora que el instrumento estaba correctamente afinado. Si bien, la mayoría de las frecuencias detectadas coinciden con la nota A, algunas no corresponden a los múltiplos esperados. Particularmente en el intervalo de 55 Hz - 440 Hz, las señales coinciden con las primeras octavas de la nota A, pero en a partir del límite superior se identifica una mayor variación dentro los picos. Por lo dicho anteriormente, las diferencias identificadas en las cualidades sonoras de las cuerdas no pueden atribuirse a una deficiente afinación, sino son producto de la propia cuerda, el bajo u otros factores presentes en el experimento. En la Tabla 5 se indican los valores de las frecuencias seleccionadas para este estudio.

Tabla 5. Frecuencias características seleccionadas en este estudio para el análisis de las cualidades sonoras de cuerdas A de bajo eléctrico comerciales

No.	Frecuencia (Hz)	No.	Frecuencia (Hz)
1	55	14	1057
2	110	15	1170
3	165	16	1460
4	220	17	1935
5	275	18	1998
6	331	19	2057
7	386	20	2370
8	440	21	2496
9	496	22	3018
10	663	23	3361
11	720	24	3500
12	946	25	3858
13	1002	26	5007

3.1 Normalidad

Mediante una prueba de Anderson-Darling, se analizó la normalidad de los datos recabados de las repeticiones en el pico con frecuencia 55 Hz. Lo anterior, antes y después de la estandarización de la salida a -6 dB. El valor P para la distribución de datos fue de 0.407 y 0.711 para antes y después de la estandarización de volumen, respectivamente. Dado que ambos valores P son mayores a 0.05 (valor umbral), los datos obtenidos presentan una distribución normal. Asimismo, se observa que el valor P después de la estandarización a -6 dB es mayor que el obtenido antes de ésta, lo que indica que, el proceso de estandarización de volumen brinda al nuevo grupo de datos un mejor comportamiento estadístico, confirmando la pertinencia de realizar dicho proceso.

3.2 Análisis Global

Para cada pico, se corrió una prueba de hipótesis ANOVA, comparando los valores de dB entre los tres tipos de cuerda (acero inoxidable, níquel y cobalto), con la finalidad de mostrar si sus valores presentan una diferencia significativa (valor umbral: 0.05). Los resultados obtenidos del análisis se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Prueba de hipótesis ANOVA para el volumen observado en diferentes frecuencias considerando diez repeticiones de las cuerdas bajo estudio.

Frecuencia (Hz)	Valor P	Frecuencia (Hz)	Valor P
55	0.209	1057	0.004
110	0.001	1170	0.148
165	0.618	1460	0.001
220	0.529	1935	0.001
275	0.736	1998	<0.001
330	0.443	2057	0.011
385	0.006	2370	<0.001
440	0.003	2496	<0.001
495	0.073	3018	0.012
665	0.009	3361	<0.001
720	<0.001	3500	<0.001
945	0.105	3858	<0.001
1002	0.013	5007	<0.001

Como puede verse, las pruebas de hipótesis no reflejaron resultados constantes para todo el espectro sonoro, esto es, se identifica que hay un comportamiento particular en cada frecuencia.

3.3 Análisis Particular

Del análisis de los resultados de la prueba de hipótesis ANOVA se observa que no hay una diferencia homogénea de una cuerda sobre otra, esto es, no todas las frecuencias de un determinado material tienen un volumen proporcional respecto a otro. Por el contrario, se encuentra que cada frecuencia tiene un comportamiento particular. Así, algunas frecuencias tienen una diferencia de volumen significativo, mientras que otras tienen volúmenes semejantes. Esto lleva a concluir que, en general, el volumen producido no depende directamente del material de fabricación, sino probablemente a la fuerza aplicada en cada caso. Sin embargo, una vez normalizado el volumen, se encuentran diferencias de volumen significativas en ciertos grupos de frecuencias. Por lo anterior, se procedió a hacer un análisis del volumen de una frecuencia o rango particular basado en las atribuciones del sonido expuestas en la sección 1.2.

3.3.1 Frecuencia fundamental (55 Hz)

El valor P de los datos de volumen de la frecuencia fundamental (55 Hz) es de 0.209, indicando que no existe una diferencia significativa en la media de volumen para las cuerdas fabricadas con distintos materiales. En la Figura 7 se representan las medias de volumen de la frecuencia fundamental. Si bien, no existe una diferencia substancial en el valor de la media, la cuerda de níquel presenta un rango de distribución menor con respecto a las demás. Posiblemente al ser la frecuencia fundamental, el material de fabricación no influye en su volumen, por tanto, se infiere que esta frecuencia no es la que da el sonido característico a cada tipo de cuerda. H. De Dayan [25] realizó un análisis análogo de cuerdas de guitarra de diferentes marcas. Este autor encontró resultados similares en la frecuencia fundamental, donde las medias del volumen no presentan una variación significativa. Los usuarios normalmente identifican al rango de frecuencias de 40 Hz - 100 Hz como el que proporciona un sonido retumbante o subgrave.

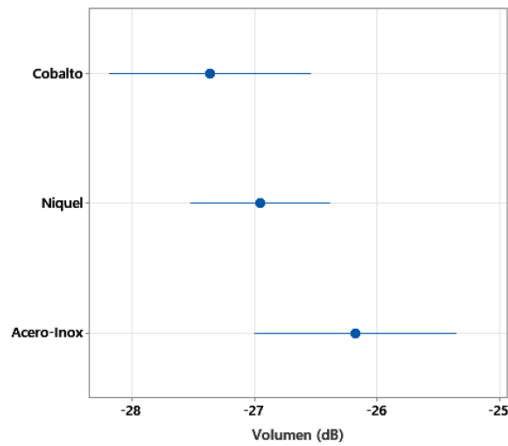


Figura 6. Distribución del volumen registrado a una frecuencia de 55 Hz de cuerdas de bajo eléctrico comerciales fabricadas con diferentes materiales.

3.3.2 Graves bajos (110 Hz - 400 Hz)

En la región de graves bajos se encontraron seis frecuencias con volúmenes significativos: 110, 165, 220, 275, 331 y 386 Hz. En la Figura 8 se muestran los datos de su comportamiento.

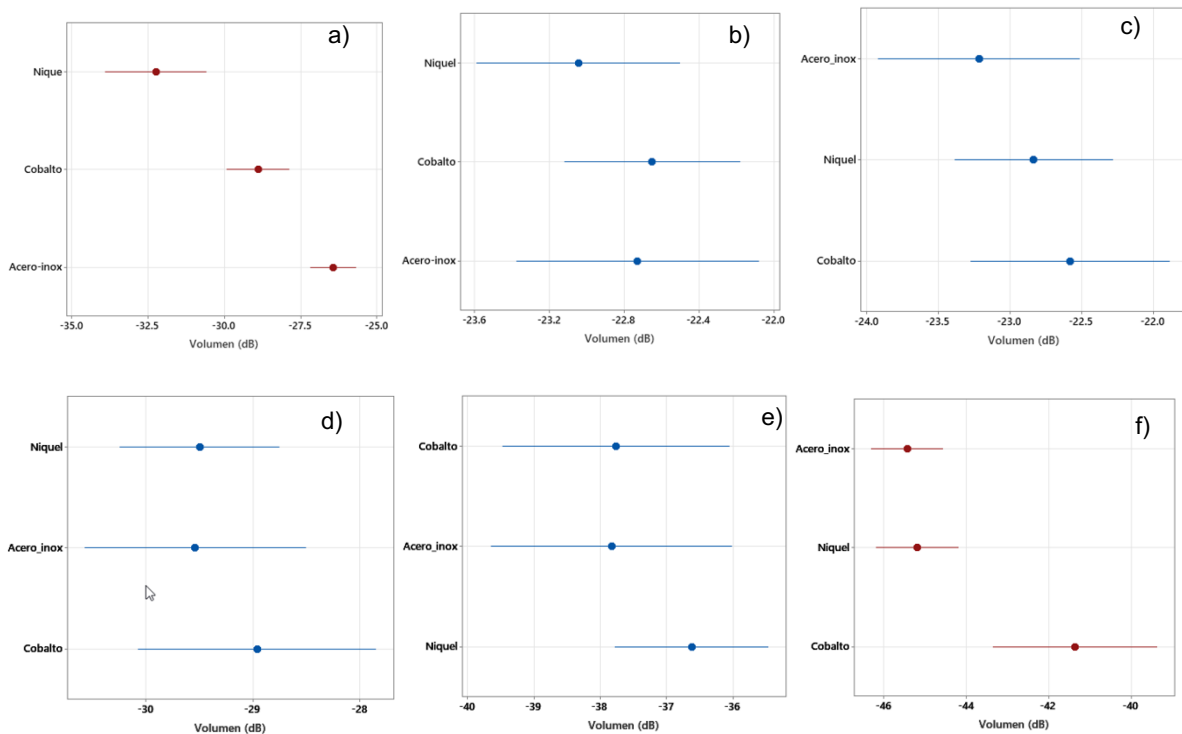


Figura 7. Distribución del volumen registrado a las frecuencias de a) 110, b) 165, c) 220, d) 275 e) 331 y f) 386 Hz en cuerdas de bajo eléctrico comerciales fabricadas con diferentes materiales.

Como se observa de la Figura 8a, los datos de volumen registrados a 110 Hz presentan una diferencia significativa con respecto al material. Entre estos, el acero

inoxidable tiene una media de volumen más alto que el resto de los materiales (-26.6 dB), le sigue el cobalto (-28.9 dB) y por último el níquel (-32.2 dB). Las frecuencias de 165, 220, 275 y 331 Hz no presentan una diferencia importante en sus medias en función del material de fabricación, aunque es de notar que sus rangos de distribución son notoriamente extensos, característica asociada un mayor dinamismo del sonido. Por último, para la frecuencia de 386 Hz, la cuerda de cobalto presenta una media de volumen mayor (-41.3 dB) respecto a la del níquel (-45.1 dB) y acero inoxidable (-45.3 dB), siendo estas últimas semejantes.

Los usuarios de producción musical refieren que es en el rango de frecuencias de 110 Hz - 400 Hz donde el bajo eléctrico genera “cuerpo”. Lo anterior se debe a que es el rango de frecuencias de los primeros armónicos. Cuando un bajo eléctrico es agregado a una composición musical, su principal objetivo es cubrir este rango frecuencias que otros instrumentos no abarcan. Por lo anterior, se puede inferir que los sonidos característicos de una cuerda no se encuentran en este rango. En este sentido, S. Revuelta de la Peña [14] menciona las características subjetivas de cada material, describiendo al níquel como una cuerda que carece de ataque (o presencia de un timbre o sonido). Al observar la Figura 8, el níquel tiene las medias de volumen más bajas en 110 y 386 Hz, dando una explicación objetiva a lo descrito por los usuarios y Revuelta de la Peña.

3.3.3 Medios Graves (440 Hz - 1000 Hz)

El rango de medios graves (440 Hz - 1000 Hz) en el bajo da a los tonos sus atributos de “claridad” y “definición” [13]. Al encontrarse en este rango de frecuencias los armónicos de orden 5 y 6 para la Nota A, hay más información para distinguir individualmente lo que se está tocando, dándole un carácter distintivo. Tanto usuarios, como S. Revuelta de la Peña, señalan a las cuerdas de acero inoxidable y cobalto como cuerdas con definición o pegada.

Es de notarse que para la región de medios graves se encontraron mayores variaciones de volumen respecto a los rangos de menor frecuencia. Particularmente, las cuerdas de cobalto y níquel poseen una media de volumen mayor respecto al acero inoxidable en las frecuencias de 440 y 495 Hz (ver Figura 9). Si bien, en el rango de 665 Hz a 1057 Hz predomina una gran cantidad de picos con una media mayor en la cuerda de acero inoxidable, en las frecuencias de 770, 945 y 1057 Hz el cobalto también comparte una media similar al primero. Por el contrario, el níquel,

presenta las medias más bajas de entre los tres materiales. Estos resultados están en acuerdo a los atributos de “claridad” y “definición” mencionados por Revuelta de la Peña para los materiales analizados.

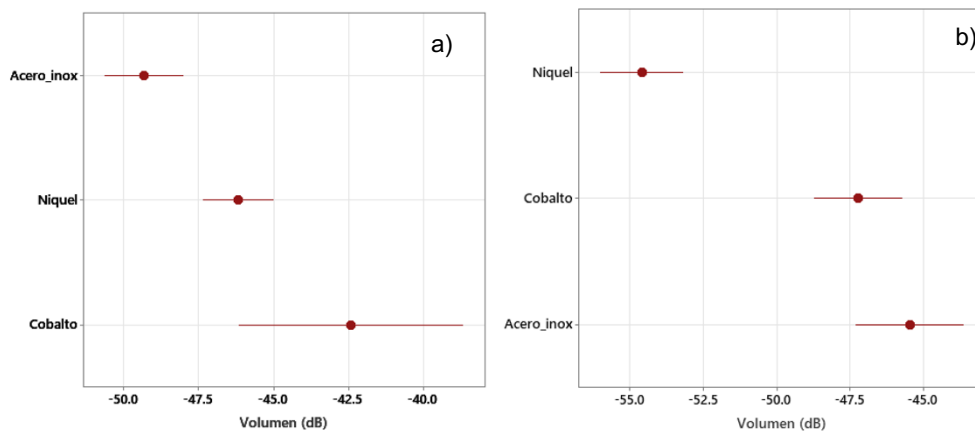


Figura 8. Distribución del volumen registrado a las frecuencias de a) 440 y b) 770 Hz en cuerdas de bajo eléctrico comerciales fabricadas con diferentes materiales.

3.3.4 Medios Agudos (1000 Hz – 3000 Hz)

I. Alonso [13] menciona al rango de medios agudos (1000 Hz – 3000 Hz) como aquel donde se encuentra el “brillo” o “articulación” del sonido. También, en este rango de frecuencias atribuye el timbre asociado a la forma en que se toca la cuerda, esto es, con dedos o púa. Al recurrir a la descripción por parte de S. Revuelta de la Peña [14] acerca de las cuerdas de acero inoxidable, se menciona que éstas tienen un sonido “metálico” o “brillante”. En este sentido, las frecuencias en la región de medios agudos para las cuerdas de acero inoxidable tienen registros de mayor volumen, correspondiendo con las descripciones subjetivas. Al tratarse de frecuencias altas más allá del rango de las notas de fundamentales o armónicos de primer orden que un bajo eléctrico puede producir, las características del sonido en la región de medios agudos se pueden atribuir a las particularidades de la cuerda, como lo es el material de fabricación.

En el caso de las distintas cuerdas analizadas, los registros de volumen de las frecuencias pertenecientes a los medios agudos tuvieron un comportamiento diferente al resto de rangos. Por ejemplo, en general, de entre las cuerdas estudiadas, la de acero inoxidable presentó la mayor media de volumen en las frecuencias analizadas, y sólo en casos particulares la media de ésta coincidió con uno u otro tipo de cuerda.

La única frecuencia donde no se observó este comportamiento fue de 1170 Hz, donde no se encontró una diferencia significativa en sus medias (ver Figura 10). La prueba de hipótesis ANOVA de esta frecuencia dio un valor P de 0.148. Sin embargo, el acero inoxidable presentó cuatro muestras cuyos valores de volumen fueron más altos que el resto de las cuerdas. Asimismo, se observa que los valores máximos del acero inoxidable llegan hasta -46dB, mientras que, para el níquel y el cobalto los valores máximos solo son hasta aproximadamente -55 dB. En este sentido se sugiere realizar más iteraciones para confirmar si la tendencia del acero inoxidable tiene una mayor media o realmente no hay diferencia significativa.

Por otro lado, la cuerda de níquel presentó frecuencias con una misma media de volumen que la de acero inoxidable dentro del rango de medios agudos, no obstante, mayormente esta cuerda mostró los registros de volumen más bajos. Esto último confirma la descripción subjetiva de este material, particularmente S. Revuelta de la Peña [14] las describe como cuerdas con un sonido suave y equilibrado. En base a los resultados, al no contar los armónicos agudos prominentes, las frecuencias que dominan el sonido producido por la cuerda de níquel son principalmente graves, haciendo que su sonido adquiera el referido carácter.

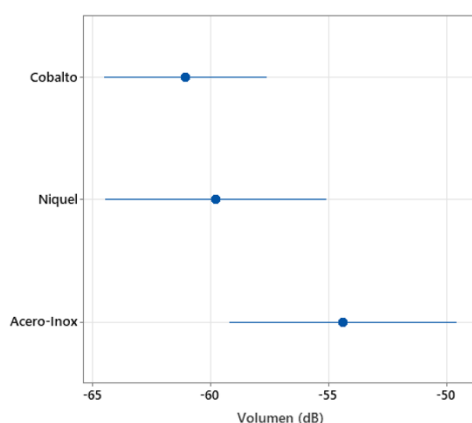


Figura 9. Distribución del volumen registrado a una frecuencia de 1170 Hz de cuerdas de bajo eléctrico comerciales fabricadas con diferentes materiales.

3.3.5 Agudos (3000-Hz – 5000 Hz)

Al igual que el rango de medios agudos, el de tonos agudos (3000-Hz – 5000 Hz) no es comúnmente utilizado por usuarios de producción musical. Asimismo, las frecuencias de los armónicos encontrados son superiores a las de cualquier tono fundamental (o primer armónico) de un bajo eléctrico convencional. Por lo que, de

manera análoga a los medios agudos, cualquier frecuencia superior a 3000 Hz contribuye a lo que se denomina “color”, “carácter” o “nitidez” del sonido. En este sentido, S. Revuelta de la Peña [14] describe a la cuerda de cobalto como una cuerda con sonido “brillante” o “nítido”.

A excepción de la frecuencia de 3500 Hz, la cuerda fabricada de cobalto presentó registros de volumen más elevados que el resto, con valores superiores a 10 dB que las de acero inoxidable y de cobalto. A pesar de existir más señales dentro de este rango, su valor de dB es más bajo que el resto de las frecuencias características, inclusive, éstas pudiesen ser atribuidas a ruido de fondo.

En la Figura 11 se presenta la distribución de los valores de volumen a una frecuencia de 5007 Hz producidas por las diferentes cuerdas analizadas. Se puede observar que, la media de volumen para el cobalto ronda alrededor de -95 dB, mientras que, para el acero inoxidable y el níquel, los valores están por debajo de -105 dB. Así, se puede asignar a la cuerda fabricada con entorchado de cobalto como la única que genera sonido en el rango de agudos. A pesar de que el volumen de las frecuencias agudas es bajo en comparación con las de los rangos mencionados en los apartados anteriores, debe considerarse que, al procesarse esta señal con otros equipos musicales empleados por usuarios, las frecuencias agudas pueden incrementar su volumen y volverse significativos para el escucha.

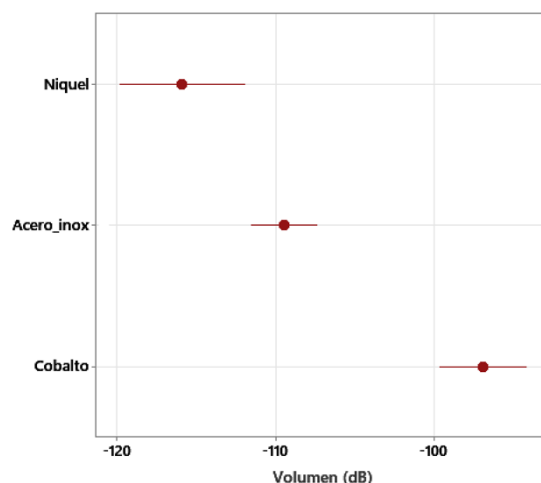


Figura 10. Distribución del volumen registrado a una frecuencia de 5007 Hz de cuerdas de bajo eléctrico comerciales fabricadas con diferentes materiales.

3.4 Respecto a la Publicidad de las Cuerdas de Cobalto

La cuerda de cobalto se anuncia como un producto con una “respuesta mejorada” dentro de un extenso rango de frecuencias (ver Figura 12). En su publicidad se presenta un comparativo de su desempeño en relación con otras cuerdas comunes en el mercado. De ésta se infiere que: a) las cuerdas de cobalto tienen un mayor volumen de respuesta (output), seguidas por las de níquel y por último las de acero inoxidable; b) las cuerdas de cobalto poseen un mayor número de frecuencias con volúmenes superiores a las de níquel o de acero inoxidable. Sin embargo, para ambos análisis no hay información respecto a la metodología empleada para recabar la información o datos mínimos que soporten las conclusiones mostradas en su publicidad.

Al comparar los resultados obtenidos en este estudio con los mostrados por Ernie Ball en sus cuerdas de cobalto [17], estos no coinciden en su totalidad. Si bien, la cuerda de cobalto analizada mostró algunos picos cuya media de volumen fue mayor a las fabricadas con acero inoxidable o níquel, esta característica no aplica a todas las frecuencias, como lo sugiere la publicidad. Por otra parte, en la Figura 12b también se puede observar que la respuesta de frecuencias de la cuerda de níquel es superior a la de acero inoxidable. De igual forma, esto se no coincide con los resultados obtenidos a lo largo del experimento, donde el níquel fue el material que presentó la mayor cantidad de picos con un volumen inferior al del acero inoxidable y el cobalto.

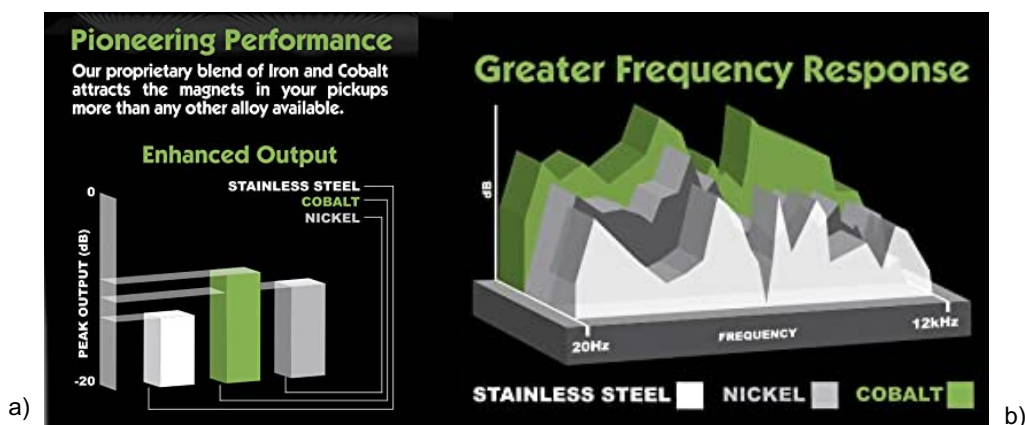


Figura 11. Publicidad contenida en el empaque de las cuerdas de cobalto marca Ernie Ball™ [17].

A pesar de no tener el mayor volumen en todos picos individuales, la cuerda de cobalto presentó una gran cantidad de armónicos entre los picos seleccionados. Esto se puede corroborar con la Figura 6, donde se observan pequeños picos (principalmente entre las frecuencias de 50 hasta 1000 Hz) sobresalir en el espectro sonoro de la cuerda de cobalto. Es importante mencionar que estas frecuencias no fueron consideradas en las pruebas ANOVA debido a que no son producidas por las cuerdas de acero inoxidable y níquel, o bien porque algunos de los registros no fueron lo suficientemente altos para discernirse del ruido de fondo. Sin embargo, estas frecuencias pueden volverse significativas en una aplicación real, donde otros equipos electrónicos o demás variables se ven influenciadas, incrementando el volumen de éstas. Aunque en esta investigación no se midió el *output* general que presentan las diferentes cuerdas, se puede discutir que los armónicos extras que se identifican en la cuerda de cobalto pueden influir en darle un mayor volumen, dándole soporte a la publicidad del producto.

Finalmente, si se analiza visualmente el espectro sonoro de la cuerda con entorchado de acero inoxidable, se encuentra que alrededor de 4000 Hz en adelante hay una caída significativa en la intensidad de la señal que ésta genera con respecto a los otros dos tipos de cuerda. También, el acero inoxidable es el material que más baja señal llega a presentar en los valles siguientes a los picos analizados. Si bien, esto no es exactamente lo que presenta Ernie Ball en su publicidad, puede encontrarse una relación cualitativa con respecto al volumen general de salida tanto del acero inoxidable como el resto de los materiales.

CONCLUSIONES

Al compararse las características subjetivas que los usuarios atribuyen a las cuerdas de bajo eléctrico comerciales fabricadas con diferentes materiales, y el espectro de frecuencias que cada una de éstas produce se encontró lo siguiente:

- 1) La cuerda de acero inoxidable se caracteriza por que las frecuencias fundamentales y primeros armónicos poseen un volumen de salida estándar. En frecuencias graves medias (400 Hz - 1000Hz), este tipo de cuerda tiene mayor volumen que las fabricadas con níquel y cobalto, lo que resulta en el sonido “definido” referido por los usuarios. En el caso de los medios agudos (1000 Hz - 3000 Hz) también se identifica un mayor volumen en esta cuerda con respecto al resto, lo que le atribuye la característica de sonido “brillante” o “metálico”.
- 2) La cuerda con entorchado de níquel posee registros de volumen significativos en las frecuencias fundamentales y armónicos de primer orden, sin embargo, respecto a los demás tipos de cuerdas carece de este en los rangos de medios graves o medios agudos. Esto se traduce en un sonido suave y equilibrado.
- 3) Entre las cuerdas analizadas, la fabricada con cobalto es la que presenta en general los valores de volumen más altos en los diferentes rangos de frecuencia analizados, siendo el más significativo el correspondiente a los sonidos agudos (3000 Hz - 5000 Hz). Esta última característica resulta en un sonido “nítido” o “brillante”. Además, este tipo de cuerda fue la que presentó armónicos adicionales a los picos analizados, lo que se asocia con una “respuesta mejorada (enhanced output)”. Sin embargo, es de mencionarse que las características de los espectros acústicos registrados no corresponden completamente con la publicidad del fabricante.
- 4) En general, los tres materiales con los que se fabrican los entorchados de las cuerdas analizadas permiten producir la nota fundamental (55 Hz) eficientemente, pero son los armónicos que la acompañan los que le brindan un “color” distintivo al sonido de cada una.
- 5) Finalmente, la literatura indica que las cuerdas cambian sus cualidades sonoras a lo largo del tiempo debido a la corrosión, la suciedad u otros factores. Aunque no se abordó este aspecto en la presente investigación, se espera que ésta incentive estudios más detallados de otros componentes musicales.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Hanson y G. Munns, «Comparision of New and "Dead" Nylon Guitar Strings,» *The Journal of the Acoustical Society of America*, p. 34', 1985.
- [2] G. Ramsey y K. Pomian, «Correlating properties of stringed instruments,» *Proccedings of Meetings on Acoustics* , vol. 21, 2014.
- [3] Iowa State University , «Physics of Nondestructive Evaluation,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.nde-ed.org/Physics/Sound/index.xhtml>.
- [4] S. Vosough, «Optimization and Evaluation of Crucial Properties for Stainless Steel Wire Used as Guitar Strings (Tesis de Maestría),» *Lulea University of Technology*, 2015.
- [5] J. R. Pierce, *The Science of Musical Sound*, New York : W.H. Freeman and Company, 2000.
- [6] T. Rossing, *Sprinter Handbook of Acoustics*, Stanford : Sprinter, 2007.
- [7] P. A. Wheeler y T. Rossing, *The Science of Sound*, Universidad de Michigan, 2010.
- [8] K. Mathias, «Decibels (dB),» 2023. [En línea]. Available: <https://audiouniversityonline.com/decibels-explained/>.
- [9] G. Di Maria, «The physics of the Electric Bass,» 30 Agosto 2022. [En línea]. Available: <https://www.eetimes.eu/the-physics-of-the-electric-bass/>.
- [10] B. Benward y M. Saker, *Muisc in Theory and Practice*, McGraw-Hill, 2003.
- [11] N. H. Fletcher y R. D. Thomas, *The Physics of Musical Instruments*, New York : Sprinter , 1998.

- [12] E. Marin, «Partes de un Bajo Eléctrico,» Agosto 2021. [En línea]. Available: <https://debajoelectrico.com/blog/partes/>.
- [13] I. Alonso, «Como Ecuilizar un Bajo,» Estudio Durango, Mayo 2021. [En línea]. Available: <https://estudiodurango.com/como-ecualizar-un-bajo/>.
- [14] S. Revuelta de la Peña, «Cuerdas de Bajo Electrico y Acustico,» 19 Julio 2019. [En línea]. Available: <https://parabajoelectrico.com/cuerdas/>.
- [15] E. A. Elnashar, «Spinning Technology in the Physical Desing Mechanics of Sound in Ballon Guitars,» *Journal of Current Engineering and Technology ISSN: 2582-1210*, p. 4, 2023.
- [16] H. Price, «All about... Acoustic Strings,» 10 Februar7 2017. [En línea]. Available: <https://guitar.com/guides/essential-guide/all-about-acoustic-strings/>.
- [17] B. Ball.Estados Unidos Patente US 8,222,504B1, 2012.
- [18] J. Watkinson, *The Art of Digital Audio*, Oxford: Focal Press, 2001.
- [19] M. Bosi y R. E. Goldberg, *Introduction to Digital Audio Coding and Standars*, Stanford : Springer Science, 2003.
- [20] Focusrite, «Scarlet Solo User Guide,» 2016. [En línea]. Available: <https://fael-downloads-prod.focusrite.com/customer/prod/downloads/Scarlett%20Solo%202nd%20Gen%20User%20Guide%20v1.1%20-%20EN.pdf>.
- [21] D. Gibson, *The Art of Mixing*, Routledge, 2018.
- [22] Steinberg, «WaveLab Pro 11 User Guide,» 2022.
- [23] S. Park y J. Park, «Aspects of Comparison of Sound according to Pick Material,» *The Korean Society of Culture and Convergence*, 2023.

- [24] K. Nishimura , «A study on timbre and sound quality of an electric guitar by selection of material around pickup,» *The 23rd International Congress on Sound and Vibration* , vol. 1, 2016.
- [25] A. Bewar y H. G. de Dayan, «The Quality of Strings for Guitar: An experimental study,» *Journal of Sound and Vibration*, Ontario, 1979.
- [26] J. Wolfe, «Strings, standing waves and harmonics,» 1997. [En línea]. Available: <http://www.phys.unsw.edu.au/jw/strings.html>.
- [27] J. Jewelt y S. A. Raymond, *Physics for scientists and Engineers with modern physics*, Cengage Learning, 2013.
- [28] NTi Audio, «Fast Fourier Transformation FFT - Basics,» s.f. [En línea]. Available: [https://www.nti-audio.com/en/support/know-how/fast-fourier-transform-fft#:~:text=The%20%22Fast%20Fourier%20Transform%22%20\(frequency%20information%20about%20the%20signal..](https://www.nti-audio.com/en/support/know-how/fast-fourier-transform-fft#:~:text=The%20%22Fast%20Fourier%20Transform%22%20(frequency%20information%20about%20the%20signal..)