

Acercamiento a las Propiedades Físicas y Acústicas de dos Arcos Alemanes en el Contrabajo

Juan Guillermo Álvarez Londoño¹, juanbass2222@gmail.com

Resumen: Esta investigación se preguntó si había diferencias entre un arco de luthier (arquetero) y un arco de fabricación china, de modo que se tuvo como objetivo, el describir las propiedades físicas y acústicas de un Arco Alemán de Pernambuco y un Arco Alemán Chino. La investigación se realizó bajo un enfoque cuantitativo, con un alcance exploratorio y se desarrolló en dos fases: mediciones físicas y mediciones acústicas de ambos arcos. Se hallaron diferencias en las características físicas para los dos arcos, mientras que en las mediciones acústicas no se hallaron diferencias significativas. De forma que la diferencia que puede marcar una distinción entre un arco y el otro, es desde la interacción y conocimiento del instrumento, pues desde allí un músico construye gran parte de su sonoridad.

Palabras Claves: Arco Alemán, Contrabajo, Propiedades Físicas, Análisis Acústico.

Abstract: This investigation asked if there were differences between a bow of luthier (craftsman) and a bow of Chinese manufacture, so that it was aimed at describing the physical and acoustic properties of a German Arch of Pernambuco and a Chinese German Arc. The research was conducted under a quantitative approach, with an exploratory scope and was developed in two phases: physical measurements and acoustic measurements of both arcs. Differences were found in the physical characteristics for the two arcs, while in the acoustic measurements no significant differences were found. So that the difference that can make a distinction between one arch and the other, is from the interaction and knowledge of the instrument, because from there a musician builds a large part of his sonority.

Keywords: German Bow, Double Bass, Physics Properties, Acoustic Analyze.

¹ Artículo de Investigación presentado para optar al título de Magíster en Música. Universidad EAFIT. Escuela de Humanidades. Departamento de Música. Medellín, 2019. Asesor: Juan David Manco, Magíster en Música de la Universidad EAFIT.

Introducción

El presente artículo, pretende abordar una de las inquietudes más importantes que acompaña al contrabajista en su vida artística, la cual hace alusión al tipo de arco que debe usar, pues las exigencias en la interpretación de su instrumento cada día son mayores, en términos de la ejecución de fragmentos, timbres, colores, efectos, entre otros. Esto quiere decir que la preocupación no sólo está en el desempeño técnico, sino también en tener un instrumento que pueda brindar una calidad sonora, de manera que es de considerar en el Contrabajo y en el Arco, aspectos como los materiales de construcción, estilo, proyección del sonido y potencia, pues permite al músico cierta facilidad y versatilidad en el momento de interpretar una obra.

En el momento de escoger un arco, es común que no se tenga una idea clara de qué se busca en un arco y puede que sólo se tenga la referencia de lo que aconseja algún maestro o los pares, de manera que cuando está la posibilidad de ir con un arquetero, no se tenga claro cómo escoger entre las opciones que se ofrecen. Aunque, puede ser que la generalidad en los primeros momentos de la carrera musical, sea acceder a arcos que son vendidos en casas musicales que, por lo general, son de fabricación china y son accesibles a nivel económico por un estudiante. Pero aun así, prevalece la pregunta por lo que se busca en un arco, cuál es el mejor.

En este punto, se debe tener en cuenta que los arcos tienen diferencias que propician o dificultan ciertos aspectos como la agilidad, la potencia, la manejabilidad, entre otros; por lo que es necesario ubicar primero las características que posee el Contrabajo, para tener una idea de cuál sería el arco que pueda ser un complemento para el instrumento, además, es necesario ubicar el tipo de repertorio que por lo general se aborda, esto también ayudará a saber qué se necesita. Cabe aclarar, que un arco no tiene igual respuesta en todos los estilos, por lo que puede surgir la necesidad de buscar otro que resalte unas características totalmente contrarias al otro.

Ahora bien, como una forma de brindar información que pueda ser confiable y de utilidad para los contrabajistas que están en busca de un arco, esta investigación se preguntó si había diferencias entre un arco de luthier (arquetero) y un arco de fabricación china, de modo que se tuvo como objetivo, el describir las propiedades físicas y acústicas de un Arco Alemán de Pernambuco y un Arco Alemán Chino, con el fin de hallar diferencias o similitudes que permitan tener un concepto claro sobre las características de un arco.

Reseña histórica del Arco

Históricamente, la transformación que ha tenido el arco ha estado vinculada con el desarrollo de características que posibilitara a los intérpretes comodidad, agilidad y una sonoridad que permitiera realizar matices. Los primeros violines del siglo XVI, tuvieron un arco similar al de sus ancestros como el *rebec*, *fiddle* o *lire da braccio* (ver figura 1) (Boyden, 1990). La forma de estos arcos, independientemente de su peso y longitud, era convexa y la cinta de las cerdas estaba fija desde un punto y se sujetaba directamente en el otro extremo (Stowell, 1992). Los principales problemas que presentaba este tipo de arcos, se basaban en la tensión que la curvatura generaba, lo cual dificultaba el control del arco, como también el sistema para sujetar las cerdas, pues éstas al estar atadas directamente al arco, uno de los puntos intervenía en el manejo del arco (Stowell, 1992; Boyden, 1990).

Con el nuevo aire de creatividad, invención y experimentación que trajo el siglo XVII, es claro que todos los cambios exigidos en los instrumentos, fueron debido a las exigencias de los intérpretes y compositores. Los arqueteros de la época, comenzaron a trabajar en la idea de construir una forma del arco que pudiera combinar tensión y elasticidad, esto llevó a realizar ciertos cambios en la estructura del arco, como un breve alargamiento de la vara, la reducción de la forma convexa de la curvatura, la selección de la madera para su construcción, las cerdas eran separadas de la vara por una nuez en forma de corno y la formación gradual de la punta para generar el balance (ver figura 2) (Boyden, 1990).

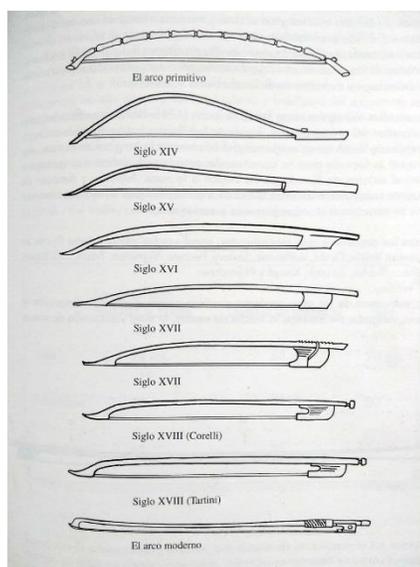


Figura 1. Evolución de los Arcos (Cardús, 2008).

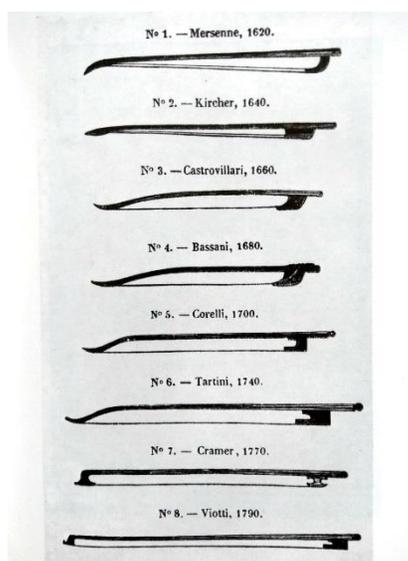


Figura 2. Evolución de los Arcos (Boyden, 1990).

También fue evidente en el siglo XVII, la continuidad de las dos formas de agarrar el arco según las comodidades técnicas y las exigencias del repertorio, mientras *la forma francesa*, en donde el arco era agarrado con la palma de la mano hacia abajo, era preferida para la música de danza; *la forma italiana*, la cual empleaba un agarre con la palma de la mano hacia arriba, era elegida por aquellos intérpretes de la sonata (Boyden, 1990).

El uso que se le daba al arco, influía indudablemente en la forma que éste tenía. Los arcos franceses tenían una forma recta en la vara y eran más cortos, los arcos italianos, eran rectos o con una curva ligeramente pronunciada hacia el exterior y eran más largos, los arcos alemanes, variaban en su longitud y poseían una forma convexa más pronunciada que los otros; esta última forma, quizá se relacionaba con su inclinación por las múltiples pausas en su música. Los arcos variaban dependiendo de su constructor y las tendencias nacionales. El agarre francés era más empleado en Francia, Inglaterra, los Países Bajos y parte de Alemania; en cambio el agarre italiano, era usado en Italia y entre los músicos más virtuosos en Alemania (Boyden, 1990).

Durante el siglo XVII, se desarrolló la familia de los instrumentos de cuerda frotada, no sólo estaba el violín, aparecieron otros instrumentos como *violino piccolo*, *violino scordato*, *viola*, *violetta*, *violetta marina*, *fagott-geige*, *violoncello* y *violone* (Boyden, 1990), siendo este último el antecesor del Contrabajo (Planyavsky, 1998). Es a partir de esta época, que se puede decir que hay referencias acerca del arco empleado en el *violone* o *basse de violon* y es de anotar que, en esta nueva línea de la familia, se conservan las distinciones en la forma de agarre del arco.

Sin embargo, la falta de estandarización en las medidas del instrumento como en el arco, hizo difícil que se pudiera hacer distinciones claras a nivel histórico entre los diferentes constructores y sobre todo entre las naciones, salvo ciertas generalidades que se han abstraído de la iconografía pictórica, instrumentos que prevalecieron hasta el tiempo actual o anotaciones generales de los maestros y compositores de la época. Hasta el momento, el centro de los arqueteros en la construcción de los arcos fueron la forma de la vara y el mecanismo para sostener las cerdas. Durante el siglo XVII, Heron-Allen (2005) expone que el sistema diseñado para tensar las cerdas, era por medio de una cremallera, ésta era una banda de metal con muescas fijada sobre la parte posterior de la vara, en donde se enganchaba en cualquiera de las muescas, un arco de metal que salía de la nuez, así la tensión del arco se regulaba a voluntad.

Fue entonces que a principios del siglo XVIII, se comenzó a realizar una distinción entre las escuelas de enseñanza y las medidas de los instrumentos. En este punto de la historia, los constructores hicieron hincapié en el arco, para así responder a las ya fijas medidas de los instrumentos de cuerda. La forma que adoptó la vara del arco fue mucho más recta y larga, incluso unos pocos arcos denotaron la incipiente curvatura del arco moderno y su punta. Respecto al peso, el balance y los métodos para sostener las cerdas, el peso del arco era más ligero incluso que el arco moderno, por lo que el balance estaba situado más cerca a la nuez. Se dio inicio al uso del tornillo para regular la tensión de las cerdas, reemplazando el mecanismo “dentado” o de “cremallera” del siglo pasado. Además, era común que en la construcción del arco se empleara la Madera de serpiente, aunque también se comenzó a utilizar el Pernambuco (Boyden, 1990).

Siguiendo la corriente de pensamiento, François Tourte habiendo recibido la influencia de Viotti, estandariza la longitud, curvatura y cabeza de los arcos de violín, viola y cello. Estableció la madera de Pernambuco como el material ideal para la construcción de arcos, debido a que combina propiedades como la tensión y la elasticidad. Además, desarrolló el sistema actual de tensión de las cerdas, esto generó más peso en la nuez, de manera que adicionó más peso en la punta, para poder generar un balance en el arco (Cardús, 1996).

En este orden de ideas, se puede decir que en el siglo XVIII se añadieron nuevos elementos que comenzaron a tener en cuenta los arqueteros para la construcción del arco, se cambió nuevamente la forma de la curvatura de la vara y surgió la inquietud sobre el tipo de madera empleada para su construcción. También, se comenzó a tener más presente el efecto del peso en la manejabilidad y se continuó desarrollando el mecanismo de tensión de las cerdas, siendo estos dos últimos considerados dos características que influyen directamente en la sonoridad del arco.

Las medidas y peso aproximado que estableció Tourte, para los arcos de los instrumentos de la familia del violín, varían según las características de cada instrumento. A medida que descende la tesitura, el arco diseñado es más corto, contrario a su peso, el cual aumenta, es decir, la vara del arco se hace más gruesa (ver tabla 1). La cantidad de cerdas, la anchura y la tensión de la mecha, crecen en la medida en que las cuerdas del instrumento son más gruesas, esto conlleva al aumento de la presión que se realiza, para poder generar una sonoridad y una proyección del sonido (Cardús, 1996).

Tabla 1

Medidas de los Arcos según el instrumento

| Instrumento | Longitud del Arco | Longitud de la mecha | Peso |
|--------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------|
| Violín | 75 cm | 65 cm | 55 - 65 grs. |
| Viola | 74 cm | 65 cm | 70 grs. |
| Violonchelo | 70 cm | 62 cm | 80 grs. |
| Contrabajo | 65 cm | 55 cm | 150 grs. |

Nota. Tomado de Cardús, C. (1996). *Estructura y Sonoridad de los Instrumentos de Arco* (pp.107). Madrid, España: Real Musical.

Ahora bien, la forma del arco para el Violín, la Viola y el Violonchelo es similar, situación que no ocurre con el Contrabajo, en el cual la forma del arco depende si el instrumentista emplea la técnica alemana para agarrar el arco (ésta es la forma italiana) o si prefiere la técnica francesa (Cardús, 1996).

Respecto a las cualidades del arco, Scott (2008) hace alusión a seis características físicas propias del arco, que marcarán una pauta importante en el instrumentista que busca el arco que mejor se adapte a su instrumento y a las necesidades que tenga. Este autor expone que, si bien la búsqueda es subjetiva, hay una dimensión objetiva que no se debe desconocer en la valoración que hace el contrabajista, la cual consiste en las características que los arqueteros desarrollaron como referencia para la construcción de los arcos: Tensión, Flexibilidad, Balance, Peso, Curvatura y Densidad.

En la presente investigación, se hará mediciones en ambos arcos sobre las características mencionadas anteriormente, exceptuando la curvatura. James (2002), define el *balance* como el lugar donde ambas mitades del arco tienen el mismo peso y según Scott (2008), el punto de equilibrio en el arco contribuye con la uniformidad de los ataques, es decir, debe tener la misma respuesta en la punta, el centro y el talón. El *balance*, está determinado por la distribución del peso, ya sea en mayor proporción en la punta o en el talón.

Otra cualidad que está íntimamente ligada a la anterior es el *peso*, que es la “fuerza con la que un objeto es atraído por la gravedad al centro de la tierra y por tanto se mide en unidades de fuerza” (Carvajal, 2008, p. 37). Respecto al arco, el peso influye directamente en la manejabilidad o comodidad de un arco, muchas veces depende de este factor la elección de un arco, más que por su balance (James, 2002). Los arcos pesados, pueden tener una gran influencia

en la producción de un sonido más lleno al pegarse mejor a la cuerda, mientras que los arcos ligeros, son más versátiles en el manejo y facilitan los pasajes rápidos, pero corren el riesgo de perder sonoridad en las notas sostenidas (Luthier, 2015).

También está la *densidad*, que se define como el cociente entre la masa y el volumen de una sustancia. Esta propiedad de la madera, tiene una influencia directa sobre la sonoridad del arco, mientras más densa sea la madera o el material de fabricación de un arco, mejor es la velocidad de propagación del sonido en ese medio, de forma que un material que sea menos denso, tendrá una menor velocidad en la propagación del sonido.

Otra característica es la *flexibilidad*, se asume como la capacidad que tiene la madera de doblarse o deformarse sin quebrarse y retornar a su forma inicial. Ésta, se parece ser una propiedad buena, pero si hay mucha elasticidad, puede hacer que un arco sea demasiado inestable (James, 2002).

Por último, la *tensión* se entiende como el resultado de la acción que ejerce dos fuerzas contrarias sobre un objeto. En el caso del arco, la tensión está vinculada directamente con la curvatura de la vara y la tensión de las cerdas. Al tensar un poco más el arco desde las cerdas, el sonido del instrumento es un poco más brillante, las notas poder ser más nítidas y requiere mayor precisión del ejecutante a la hora de realizar los cambios de sentido del arco. En cambio, con las cerdas un poco más sueltas, el sonido es más amable, menos brillante. Esta tensión depende del gusto de cada intérprete.

Mediciones acústicas

Como bien se sabe, la acústica se define como la ciencia que estudia el fenómeno sonoro desde la producción, la propagación y la recepción del sonido (Cabrera, 2010). Al hacer referencia a la acústica, ésta no sólo aborda el sonido dentro del rango audible por el ser humano, también aquel que supera los límites de la escucha, como el infrasonido y el ultrasonido, las vibraciones en objetos y las denominadas ondas sonoras de alta intensidad y de choque (Kinsler et al., 2000; Beranek, 1986; citados por Rodríguez & Guarín, 2013).

Con respecto a la acústica musical, Moral (2000) dice que es la ciencia que estudia las señales acústicas relacionadas con la música, en donde la actividad investigativa y docente, se centra en varios aspectos de tipo físico y de tipo psicoacústico, que conectan con la actividad musical. Esta rama de la ciencia, se basa en las mediciones acústicas para obtener los datos que

requiere procesar. Las mediciones acústicas, se diseñaron con el fin de medir objetivamente los diferentes parámetros acústicos que involucran un recinto o un espacio (Cabrera, 2010).

Sin embargo, existe un problema en el uso de medidas acústicas, esto es la interpretación de las mismas, ya que al utilizar métodos de análisis acústico, se miden de forma computarizada las propiedades específicas de una forma de onda, semejante a la producida, pero modelada por una teoría, lo cual puede presentar ciertos márgenes de error, pues la onda modelada dependerá de los parámetros que emplea el programa para su transcripción. Pero esta situación, puede ser controlada con el establecimiento de normas que permitan obtener una mayor confiabilidad en el resultado (Elisei, 2012).

Con respecto a las mediciones en instrumentos musicales, hay dos conceptos fundamentales a entender, para tener una guía en el momento de hacer las mediciones y la lectura de ellas, esto es la Radiación del sonido y el Campo cercano y Campo reverberante.

Radiación del sonido

Cuando se habla de radiación sonora, se hace referencia al fenómeno físico-acústico que relaciona una fuente sonora con su directividad y amplitud en frecuencia. La radiación sonora, considera la manera en la cual el medio elástico de propagación influye sobre la difusión del sonido (Beranek, 1969).

La direccionalidad frecuencial de los diferentes instrumentos musicales, está ligada a diversos factores involucrados, principalmente en el proceso de construcción e interpretación del instrumento, con lo cual, se puede decir que esta directividad en frecuencia depende de los materiales involucrados en la construcción y de la forma particular del instrumento junto con la manera en la cual es interpretado (Ferro, 2011).

Específicamente en el Contrabajo, su rango de operación en frecuencia se comprende entre los 41 Hz y los 294 Hz para sus notas fundamentales, pero, debido a su forma particular, los materiales involucrados en la misma, las cuerdas utilizadas y la manera en la cual se interpreta, se genera un contenido frecuencial armónico en frecuencias superiores (“Electrofante”, s/f), estos armónicos en frecuencias superiores, son columnas de aire adicionales, las cuales se generan al excitar una frecuencia fundamental. Dichos armónicos pueden ser pares o impares, de manera que, si la frecuencia fundamental excitada es 41 Hz, se presentará un primer armónico par en 82 Hz y un primer armónico impar en 123 Hz (Sanjurjo & Garzón, 2016).

Campo cercano y Campo reverberante

Aquí se tiene en cuenta la atenuación por distancia del sonido, debido al medio de propagación como a la forma esférica mediante la cual se esparce una onda sonora en un recinto. Esta atenuación, surge a medida que se duplica la distancia y la presión sonora se verá disminuida en 6 dB, de manera que si a 10 centímetros de la fuente se tiene un nivel de presión sonora de 90 dB, al duplicar esta distancia (20 cm), este nivel decaerá hasta los 84 dB; esto siempre y cuando se garantice la situación de campo cercano sobre la fuente (Everest & Polhmann, 2009).

Entonces, al analizar los recintos sobre los cuales se llevan a cabo mediciones acústicas, es importante destacar que todos están conformados por dos zonas diferentes, en las cuales el sonido tiende a variar sus componentes energéticos, estas zonas se denominan campo cercano y campo reverberante.

Se define campo cercano, como aquel sobre el cual el sonido directo de una fuente, tiene mucha mayor influencia que las reflexiones propias dadas por la “acústica” del recinto, lo cual quiere decir que dichas reflexiones no influyen significativamente sobre un hipotético proceso de medición. Para esta zona, el sonido se ve afectado únicamente por la ley de atenuación por distancia, así se puede decir que, si se realiza una medición acústica para presión sonora a 25 cm de distancia de la fuente y al duplicar esta distancia se obtiene una atenuación de aproximadamente 6 dB, se estaría garantizando la condición de campo cercano, fundamental en el proceso de caracterización acústica de artefactos e instrumentos musicales. Por su parte, el campo reverberante o campo difuso, es aquel en el cual el nivel de presión sonora de las reflexiones, contribuye a la suma con el sonido directo y, por tanto, no permite garantizar el cumplimiento de la ley de atenuación por distancia (Rossing, Wheeler & Moore, 2002).

Metodología

Esta investigación se realizó bajo un enfoque cuantitativo con un alcance exploratorio y se desarrolló en dos fases. La primera de ellas, consistió en tomar las medidas de las características físicas de ambos arcos, tales como, el peso, la longitud, la densidad, el balance y la elasticidad.

Para el *peso*, se utilizó una gramera de precisión que lograra cubrir la longitud del arco, para obtener mayor precisión en este dato. En la *longitud*, no sólo se midió con un metro de un extremo al otro en ambos arcos, también se muestran otras dimensiones como la longitud de las cerdas, la distancia de la nuez con el extremo más próximo del arco, la longitud de la punta y se subdividió la vara de los arcos en doce partes aproximadamente, en donde se tomó medida del grosor de cada parte, con el fin de ilustrar ésta dimensión en cada arco.

Respecto a la *densidad*, es de saber que es la propiedad física que se halla dividiendo la masa sobre el volumen, de manera que, fue necesario obtener estos datos, para poder dar con el resultado de la densidad en ambos arcos. Para la masa, fue necesario utilizar el peso, el cual es entendido como la masa por la aceleración, entonces, si se requiere despejar la masa, se tiene que dividir el peso por la aceleración y así conseguir el resultado. Luego, el volumen fue obtenido a partir de aproximar la forma de la vara del arco con la forma de una pirámide truncada o tronco de pirámide octogonal. Primero, se parte de la base de que ambos arcos tienen una forma octogonal y segundo, comienzan en el talón con un grosor mayor al que termina siendo en la punta, lo que asemeja la forma del arco con una pirámide que se construye partiendo de un polígono regular, sólo que en un punto determinado de la pirámide, ésta es cortada de forma transversal, obteniendo así un tronco de pirámide (ver figura 3).

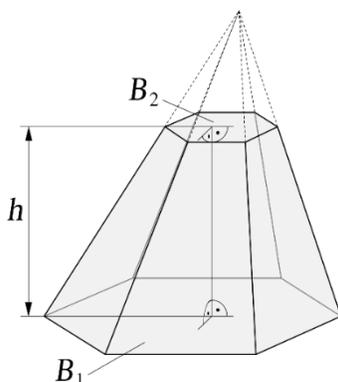


Figura 3. Tronco de pirámide hexagonal (Wikipedia, 12 de marzo de 2019).

Ahora, para la *medición de la elasticidad de los arcos*, se realizaron mediciones de la deformación de la vara, de manera que se sujetó cada arco de la nuez en una prensa y se colocó un peso a una distancia determinada a partir del punto de apoyo. La lectura de la deformación fue registrada por un medidor de carátula, graduado en milésimas de pulgada. Se hicieron nueve mediciones en cada arco y se sacó un promedio de la deformación. Cabe aclarar, que las cerdas estaban totalmente sueltas para evitar que influyeran en la medición. Por último, se halló el *centro de gravedad* de ambos arcos, el cual se encontró al poner cada arco sobre una vara y por ensayo y error, mover el arco hasta que éste pudiera conservar un equilibrio por sí solo.

Por otra parte, la segunda fase de la investigación, fue el *análisis de las frecuencias del Contrabajo*. Aquí se realizaron dos mediciones diferentes. Entonces, para determinar un recinto idóneo en el cual se pueda hacer el proceso de medición, es necesario tener en cuenta que sea un espacio controlable, dentro del cual los cambios de presión atmosférica y de temperatura no se den de manera abrupta, además de que no se produzcan ráfagas de viento.

Si bien un espacio ideal para llevar a cabo una caracterización acústica, sería una cámara anecoica (recinto sin reverberación y con ruido de fondo imperceptible), es posible realizar una buena práctica dentro un entorno controlable en sus condiciones atmosféricas y con un nivel bajo para ruido de fondo. Teniendo en cuenta estas consideraciones, se decidió llevar a cabo el proceso de medición en el estudio de grabación “D” de la Universidad de San Buenaventura seccional Medellín, sobre el cual inciden bajos niveles de ruido de fondo y cuenta con condiciones de temperatura controlables.

En primera instancia, se realizaron mediciones de sonido tocando cada una de las cuerdas del Contrabajo con ambos arcos y se registraron las mediciones de cada arco con cada cuerda, por medio de una grabadora digital marca Sony. Se realizaron varias mediciones para cada caso para observar la variabilidad y obtener un promedio de la onda en cada cuerda. La grabación se efectuó almacenando 48.000 valores por segundo y un rango dinámico de 24 bits. Luego, se analizaron las señales almacenadas por medio del programa virtual Labview 7.1, construido específicamente para procesar estas grabaciones.

Luego de verificar que las grabaciones no contenían frecuencias por encima de los 1.000 Hz, se construyó una gráfica por cuerda, en donde se muestran los valores extremos de cada una, el promedio y una comparación entre ambos arcos, en estas gráficas se muestran las señales en el

tiempo de los arcos con cada cuerda y se realizó una transformada de Fourier, para obtener los espectros de amplitud correspondientes a cada señal.

En segunda instancia, se realizaron unas mediciones que comprenden todo el rango de frecuencias del Contrabajo, se procedió entonces a seleccionar las herramientas de medición, plasmar las consideraciones generales para la medición y explicar en qué consiste el experimento estadístico factorial, el cual permitirá realizar una lectura de las mediciones tomadas con ambos arcos.

Sistema de medición

Las herramientas seleccionadas para la realización de las mediciones fueron el sonómetro Cesva SC310, el cual permitió garantizar condiciones de campo cercano durante el proceso de medición, y el micrófono de grabación DBX RTA-m, debido a su respuesta plana en frecuencia y calidad de componentes, fue seleccionado como el micrófono adecuado para llevar a cabo las grabaciones a las cuales se sometió el contrabajo (ver figura 4).



Figura 4. a. Sonómetro Cesva SC310. b. Micrófono dbx RTA-m. Elaboración propia.

Consideraciones para la medición

- Teniendo en cuenta el rango de operación en frecuencia del Contrabajo, se procuró cubrir la totalidad de este, para lo cual se decidió realizar las mediciones con intervalos tonales de cuartas justas, lo cual equivale a un total de cuatro mediciones para cada arco en estudio una por cada cuerda del instrumento.
- El pivote del Contrabajo se cubrió con caucho y se apoyó sobre una superficie diferente a madera, para evitar que el sonido del mismo pueda verse modificado, debido al efecto de

fork-tabletop, el cual consiste en que, al estar el pívot apoyado directamente sobre una superficie de madera, podría aprovecharse de este material y modificar el sonido que se percibe del instrumento.

- La afinación del Contrabajo se verificó antes del inicio de las mediciones sobre el mismo.
- Las cuerdas del Contrabajo no se cambiaron durante el proceso de medición, dado el caso de que una cuerda se rompa, se deberá reemplazar e iniciar nuevamente el proceso de medición desde cero, esto, con el fin de garantizar igualdad de condiciones en el instrumento para cada medición llevada a cabo.
- La colofonia usada para cada arco, fue la misma y en una cantidad proporcionada para cada arco, de manera que se garantizó la equidad entre ambos arcos, para no favorecer el agarre de uno por sobre el del otro.
- Se garantizó, además, condiciones de campo cercano (reducción de 6dB cada que se duplica la distancia), para evitar que los resultados se vean alterados, debido a las reflexiones propias que se generan al excitar el recinto.

Experimento estadístico factorial

Para poder realizar el experimento estadístico factorial, primero se procesaron los audios obtenidos en la medición por medio de un software, al cual se le debe cargar el audio que se desea estudiar, para que éste entregue como resultado una tabla de Excel, en la cual se plasme el comportamiento en Frecuencia vs Decibeles de cada audio para las frecuencias de 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315 y 400 Hz, garantizando así que se cubra el rango de frecuencias de operación del contrabajo en el análisis de cada audio.

El experimento factorial que fue diseñado para este estudio, consistió en la interpretación de cada cuerda del instrumento utilizando cada uno de los arcos, de manera tal que se obtuvieron ocho mediciones, cuatro por cada arco, sin embargo, los experimentos factoriales tienen dos requerimientos primordiales. El primero, es que el procedimiento debe ser iterado al menos dos veces, de manera que, en lugar de ocho resultados para el análisis, ahora se obtendrán dieciséis (interpretando dos veces cada cuerda con cada arco). La segunda consideración, consiste en que para el experimento diseñado (ver tabla 2), las 16 pruebas deben realizarse de manera aleatoria, para poder así garantizar que el “error” causado por efectos como las condiciones atmosféricas y humanas se distribuya equitativamente durante el experimento.

Tabla 2

Experimento Factorial Diseñado para la Investigación

| StdOrder | RunOrder | PtType | Blocks | Arco | Cuerda |
|----------|----------|--------|--------|------------|--------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | Pernambuco | 1 |
| 2 | 5 | 1 | 1 | Pernambuco | 2 |
| 3 | 10 | 1 | 1 | Pernambuco | 3 |
| 4 | 14 | 1 | 1 | Pernambuco | 4 |
| 5 | 3 | 1 | 1 | Chino | 1 |
| 6 | 7 | 1 | 1 | Chino | 2 |
| 7 | 16 | 1 | 1 | Chino | 3 |
| 8 | 9 | 1 | 1 | Chino | 4 |
| 9 | 13 | 1 | 1 | Pernambuco | 1 |
| 10 | 15 | 1 | 1 | Pernambuco | 2 |
| 11 | 2 | 1 | 1 | Pernambuco | 3 |
| 12 | 4 | 1 | 1 | Pernambuco | 4 |
| 13 | 11 | 1 | 1 | Chino | 1 |
| 14 | 8 | 1 | 1 | Chino | 2 |
| 15 | 12 | 1 | 1 | Chino | 3 |
| 16 | 6 | 1 | 1 | Chino | 4 |

stdOrder: numeración estándar de pruebas.

RunOrder: orden de realización para cada prueba.

PtType: variable para identificación del rol en el experimento factorial.

Blocks: variable para identificación del rol en el experimento factorial .

Teniendo en cuentas estas aclaraciones, la primera parte del montaje experimental para la realización de las mediciones, consistió en la ubicación del Contrabajo y el contrabajista, para realizar tres mediciones mediante el sonómetro Cesva SC310, que como fue mencionado, fue el instrumento de medición seleccionado para garantizar las condiciones de campo cercano por medio del cumplimiento de la ley del inverso cuadrado, dichas mediciones se realizaron a 25, 50 y 75 cm (ver figura 5) y los resultados obtenidos pueden observarse en la tabla 3:

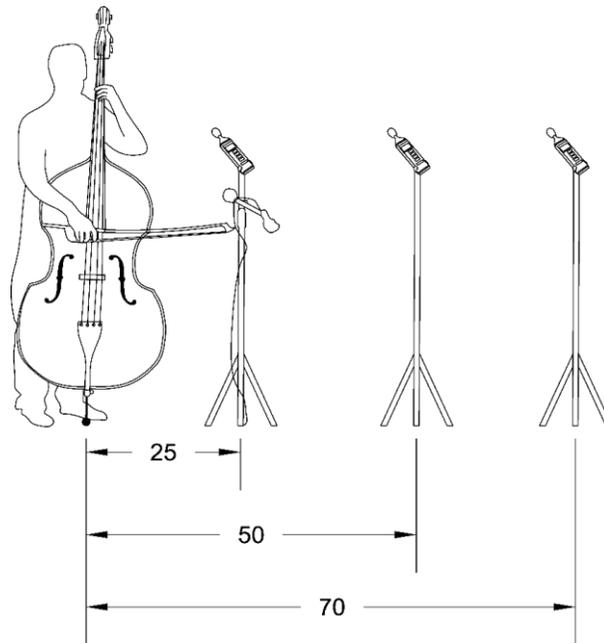


Figura 5. Ubicación del sonómetro. Elaboración propia.

Tabla 3

Verificación de Campo Cercano

| Distancia (m) | Nivel equivalente (dBspl) |
|---------------|---------------------------|
| 0.25 | 78.3 |
| 0.5 | 72.4 |
| 0.75 | 67.3 |

Los resultados mostrados en la anterior tabla, evidencia el cumplimiento de la ley de atenuación por distancia entre 25 y 50 cm, mientras que entre 50 y 75 cm, se presentó una reducción de apenas 5.1 dB, por lo cual se evidencia que las reflexiones de la sala hicieron un aporte sobre la medición, y por ende, no se puede garantizar condiciones de campo cercano después de los 50 centímetros. A causa de las evidencias sobre las condiciones de campo cercano y campo reverberante, se decidió ubicar el micrófono de medición dbx RTA-m a 25 centímetros de distancia del Contrabajo.

Paso seguido, se procedió a ubicar el micrófono de medición y a realizar su respectiva conexión con la interfaz de audio, la cual se enlazó al software para captura y edición de audio “Protools HD 10”, se verificó el diagrama de flujo (ver figura 6) y se realizaron pruebas de grabación para corroborar el correcto funcionamiento del sistema.

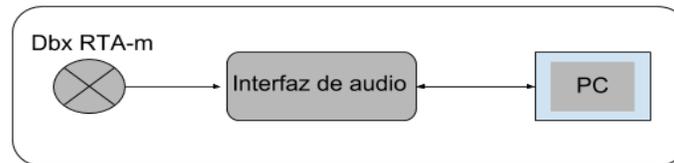


Figura 6. Diagrama de flujo para el sistema de medición. Elaboración propia.

Una vez corroborado el correcto funcionamiento del sistema de medición, se procedió a realizar las 16 grabaciones estipuladas en el orden aleatorio mostrado en la tabla 1. Después de que se realizaron estas grabaciones, se procedió a cargar cada una al software encargado de brindar la información frecuencial de 40 a 400 Hz en decibeles, obteniendo así 16 filas y 11 columnas en una tabla de Excel, con la información necesaria para la realización del estudio estadístico. Se procedió entonces, a realizar el análisis de varianza sobre el experimento factorial mediante el software Minitab 18, que permitió conseguir la información necesaria para determinar si los arcos con los cuales se interpretó el Contrabajo durante el experimento, tuvo una influencia relevante sobre los resultados obtenidos.

Resultados

A continuación, se hará una exposición del procedimiento y los resultados obtenidos en cada una de las cinco características físicas de ambos arcos, que fueron tomadas en cuenta en esta investigación.

Mediciones Características físicas

- **Longitud:** Como se puede observar en la figura 7, el Arco Chino tiene una longitud de 70.5 cm. El tornillo mide 6 cm, las cerdas tienen una extensión de 56 cm y la punta mide 4 cm.

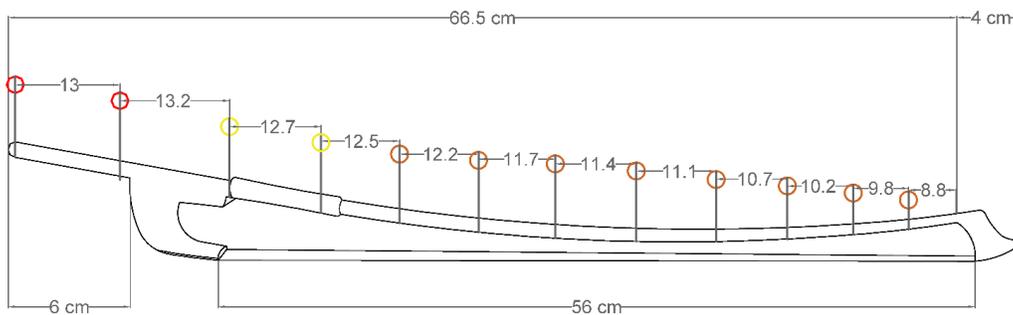


Figura 7. Arco Chino. Elaboración propia.

Mientras que el Arco de Pernambuco, tiene una longitud de 67.5 cm. El tornillo mide 8 cm, las cerdas tienen una extensión de 52.5 cm y la punta mide 5 cm (ver figura 8).

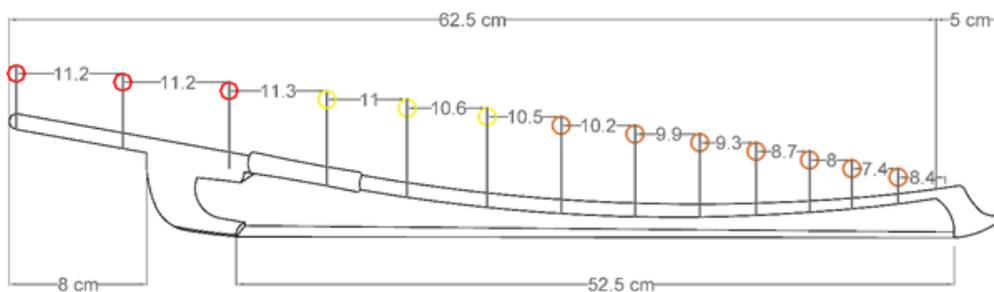


Figura 8. Arco de Nivel Profesional

En la figura 7 y 8 se puede observar las dimensiones y geometría de ambos arcos. De las figuras, se aprecia que el Arco Chino es un poco más robusto y más largo respecto al Arco de Pernambuco.

- **Densidad:**

Para medir esta unidad, se requiere dividir la masa de un material por su volumen. El procedimiento realizado para hallar el volumen de toda la vara, fue utilizar la fórmula para hallar el volumen de un tronco de pirámide octogonal, en donde éste es igual a la longitud dividido sobre 3, multiplicado por la suma de la base 1, más la base 2, más la raíz cuadrada del producto de la multiplicación entre la base 1 y las base 2:

$$V_p = \frac{1}{3} l (B_1 + B_2 + \sqrt{B_1 \cdot B_2})$$

Entonces, en el Arco Chino el volumen del tronco de pirámide octogonal es igual a 70.4532 cm³ y su masa es de 14.1836 gr, con lo que su densidad es igual a 0.2013 gr/ cm³. Para el Arco de Pernambuco, el volumen es igual a 54.0656 cm³ y su masa es de 13.7346 gr, siendo su densidad igual a 0.2440 gr/ cm³. Lo que quiere decir que el Arco de Pernambuco, tiene una densidad mayor que el Arco Chino.

- **Flexibilidad:**

Para comparar la elasticidad de los dos arcos, se realizaron mediciones de la deformación al sujetar los arcos desde la nuez en una prensa y colocando un peso de 250 grf, a una distancia de 400 mm a partir del punto de apoyo en la prensa. Se midió la deformación de la vara, a una distancia de 500 mm a partir del punto de apoyo. Para realizar la lectura, se utilizó un medidor de carátula graduado en milésimas de pulgada (ver figura 9). Es de aclarar, que esta medición se realizó con las cerdas totalmente sueltas, para evitar que éstas influyeran en la medición.

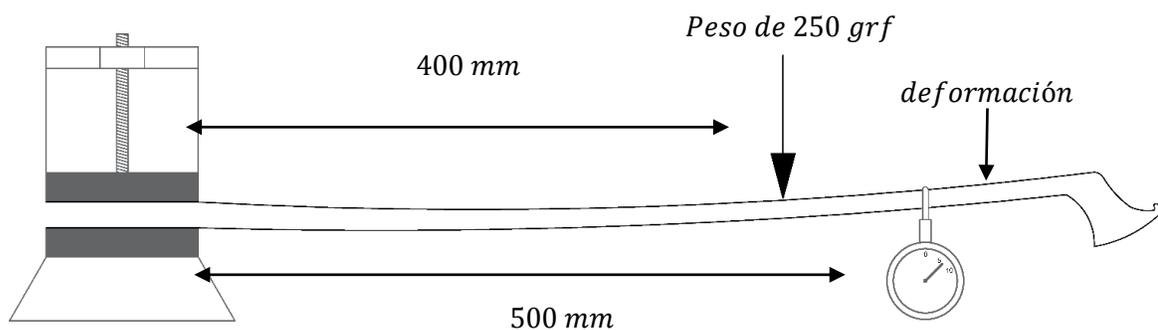


Figura 9. Esquema para la medición de la deformación en ambos arcos. Elaboración propia.

En cada arco se realizaron nueve mediciones, con el fin de hallar un promedio de la deformación en cada uno de ellos. En el Arco Chino, el promedio fue de 154.3 milésimas de pulgada, esto es equivalente a 3.9 mm. Los valores medidos para el fueron:

154 milésimas de pulgada - 152 milésimas de pulgada - 154 milésimas de pulgada
 153 milésimas de pulgada - 155 milésimas de pulgada - 155 milésimas de pulgada
 156 milésimas de pulgada - 159 milésimas de pulgada - 156 milésimas de pulgada

Las mediciones correspondientes al Arco de Pernambuco, arrojan que su promedio fue de 160.9 milésimas de pulgada, esto es equivalente a 4.08 mm. Los nueve valores obtenidos fueron:

162 milésimas de pulgada - 165 milésimas de pulgada - 162 milésimas de pulgada
 156 milésimas de pulgada - 158 milésimas de pulgada - 159 milésimas de pulgada
 160 milésimas de pulgada - 156 milésimas de pulgada - 160 milésimas de pulgada

Como se puede observar, la deformación del Arco de Pernambuco es 0.18 mm, mayor a la deformación del Arco Chino, lo que quiere decir que éste último es más rígido. Sin embargo, estos valores pueden verse afectados por la geometría de los arcos, ya que como se ilustró en las figuras 7 y 8, el Arco Chino es levemente más largo y grueso, en comparación con el Arco de Pernambuco.

- **Peso:**

Aquí, se obtuvo el peso del Arco completo. El peso total del Arco Chino es de 139 grf y el peso total del Arco de Pernambuco es de 134.6 grf. Como se puede apreciar, en los valores anteriores, el peso de ambos arcos es muy similar siendo un poco mayor el peso del Arco Chino.

- **Balance:**

Por medio del método de ensayo y error, se buscó el centro de gravedad o punto de equilibrio de cada arco, al poner cada arco sobre una varilla de acero, hasta que cada uno no se inclinara hacia un lado o hacia el otro, sino que se mantuviera sobre la varilla por la distribución de su peso. El centro de gravedad del Arco Chino está a 13 cm de la nuez y a 42,3 cm del extremo de la punta de las cerdas y (ver figura 10). Mientras que en el Arco de Pernambuco, está a 10 cm de la nuez y a 42 cm del extremo de la punta de la cerdas (ver figura 11).

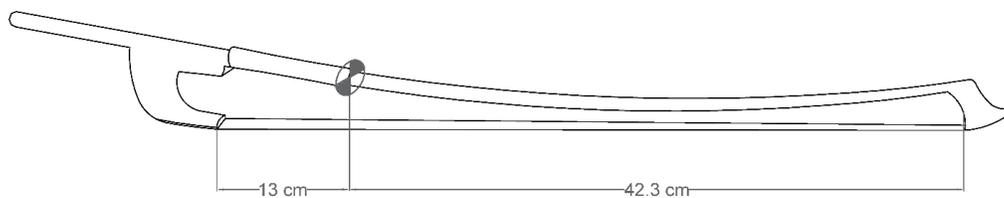


Figura 10. Centro de gravedad en el Arco de Nivel Estudiantil. Elaboración propia.

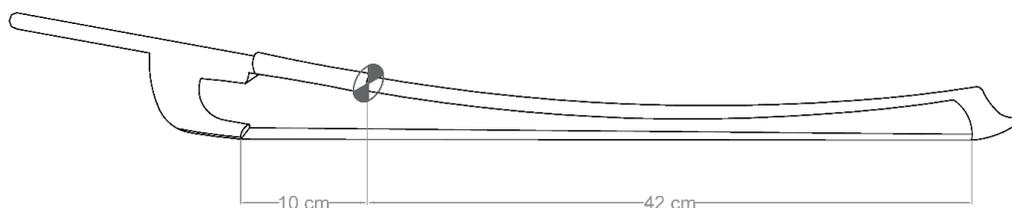


Figura 11. Centro de gravedad en el Arco de Nivel Profesional. Elaboración propia.

- **Tensión de las cerdas:**

De forma intencional, se realizó una medida adicional en ambos arcos, para homogenizar una condición que puede alterar los resultados en las mediciones acústicas de los arcos, esto es la tensión de las cerdas. Se tomó como referencia, la tensión que se considera adecuada para tocar el instrumento con el Arco de Pernambuco. Es así que, se sujetó la vara del arco con una prensa y luego se colocó un peso de 245 grf, en el centro de las cerdas, para medir la deformación de ellas (ver figura 12).

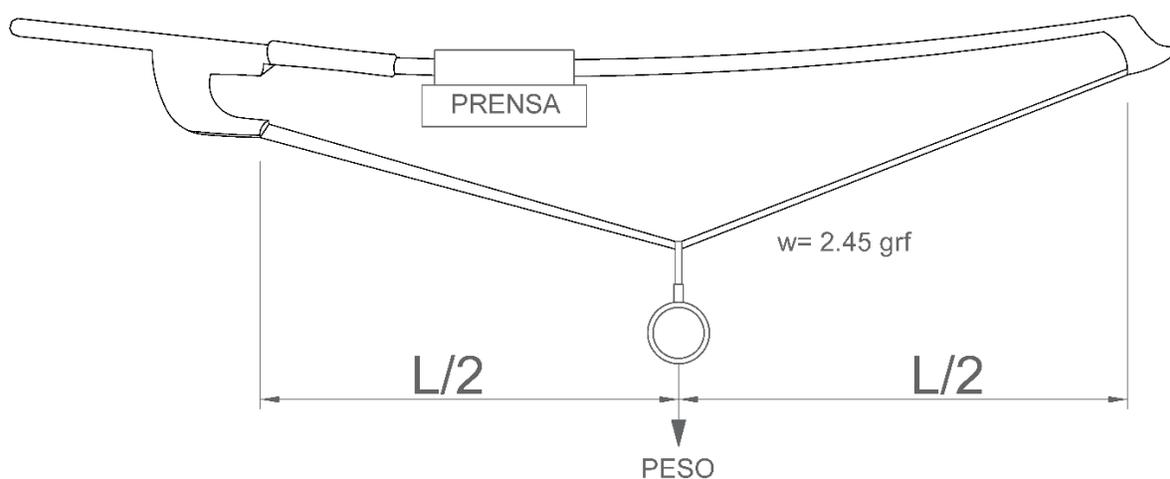


Figura 12. Deformación de las cerdas. Elaboración propia.

Al obtener la tensión de las cerdas en el Arco de Pernambuco, se procedió a calcular la deformación que deben tener las cerdas del Arco Chino al colocarle el mismo peso de 245 grf, teniendo en cuenta que la longitud de las cerdas de este arco es diferente (ver figura 13).

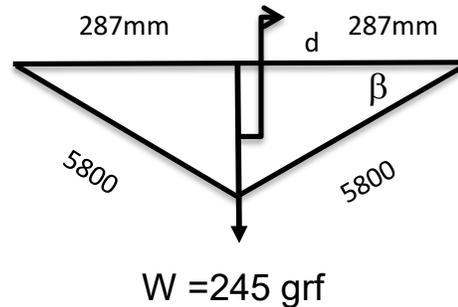


Figura 13. Diagrama Arco Chino. Elaboración propia.

El valor de 6.06 milímetros, es el valor de la deformación que deben tener las cerdas para que su tensión sea de 5.8 Kgf, que es la misma tensión que se colocó al Arco de Pernambuco. De esta forma, ambos arcos quedan con la misma tensión para hacer las mediciones de acústicas.

Mediciones Acústicas

Se realizaron mediciones acústicas en ambos arcos, utilizando el mismo Contrabajo (Xavier Jacquet). En el primer plano de las mediciones, se realizaron cuatro mediciones por cuerda en donde se muestra la frecuencia fundamental y sus armónicos (ver figura 14). Como se puede ver, en las mediciones los espectros se componen casi en su totalidad por una frecuencia fundamental y muchos armónicos, lo cual no facilita la comparación de los sonidos producidos por ambos arcos en las diferentes cuerdas.

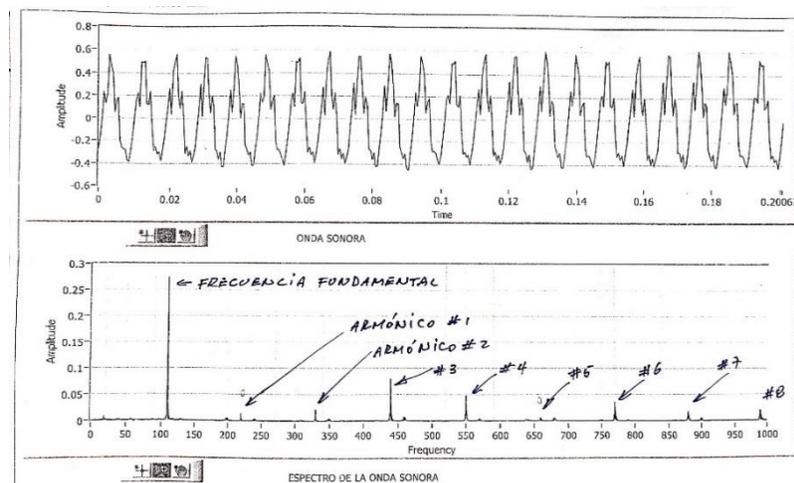


Figura 14. Oscilograma y Espectrograma de la Cuerda 1 en el Arco de Pernambuco. Elaboración propia.

A partir de estas mediciones, se obtuvo otra gráfica manual, en donde se tomaron los valores mínimos y máximos de cada cuerda y se hizo una gráfica con el promedio de la cuerda con cada arco (ver figuras 15, 16, 17 y 18).

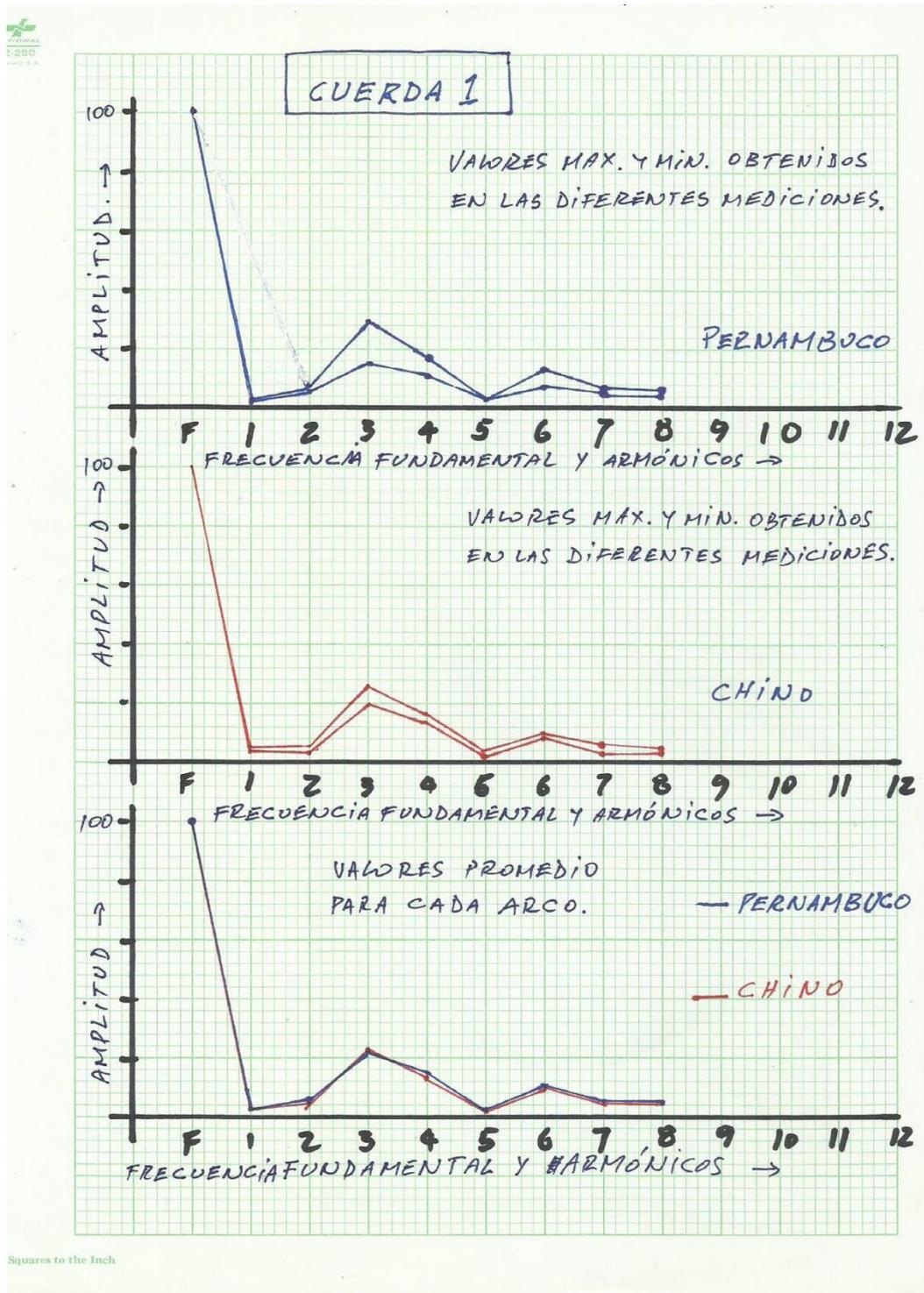


Figura 15. Espectrograma Cuerda 1 Arco de Pernambuco y Arco Chino. Elaboración propia.

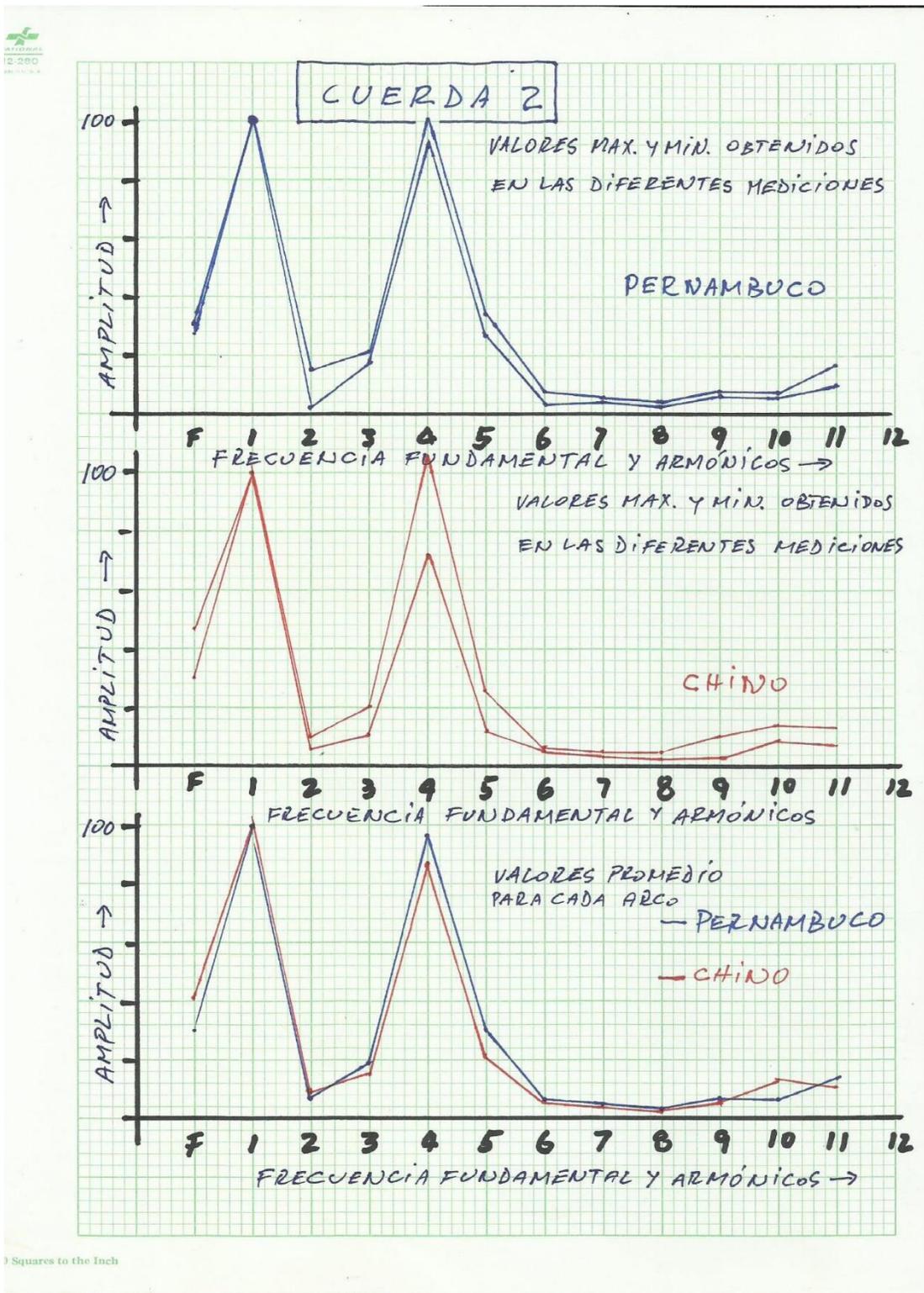


Figura 16. Espectrograma Cuerda 2 Arco de Pernambuco y Arco Chino. Elaboración propia.

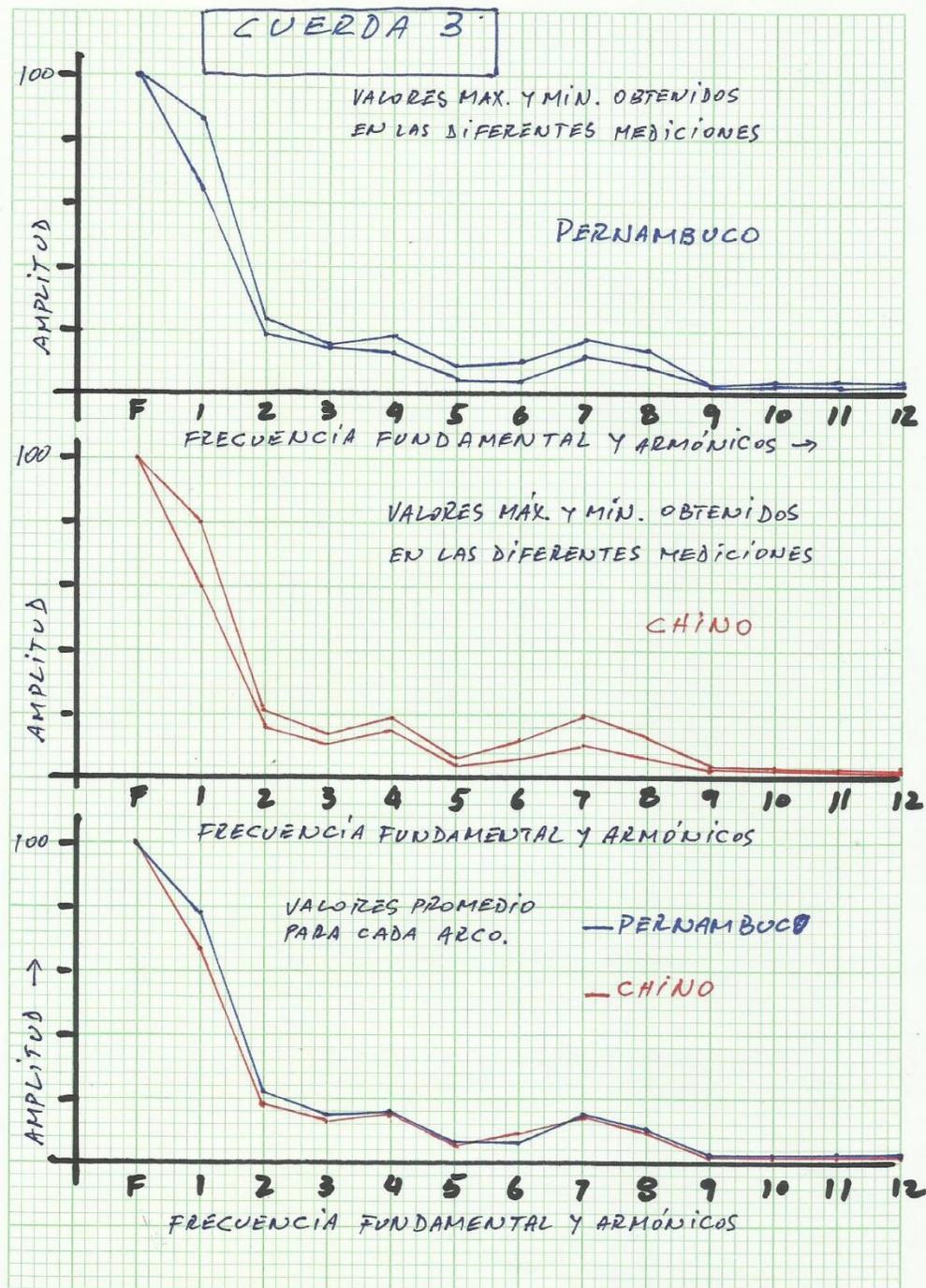


Figura 17. Espectrograma Cuerda 3 Arco de Pernambuco y Arco Chino. Elaboración propia.

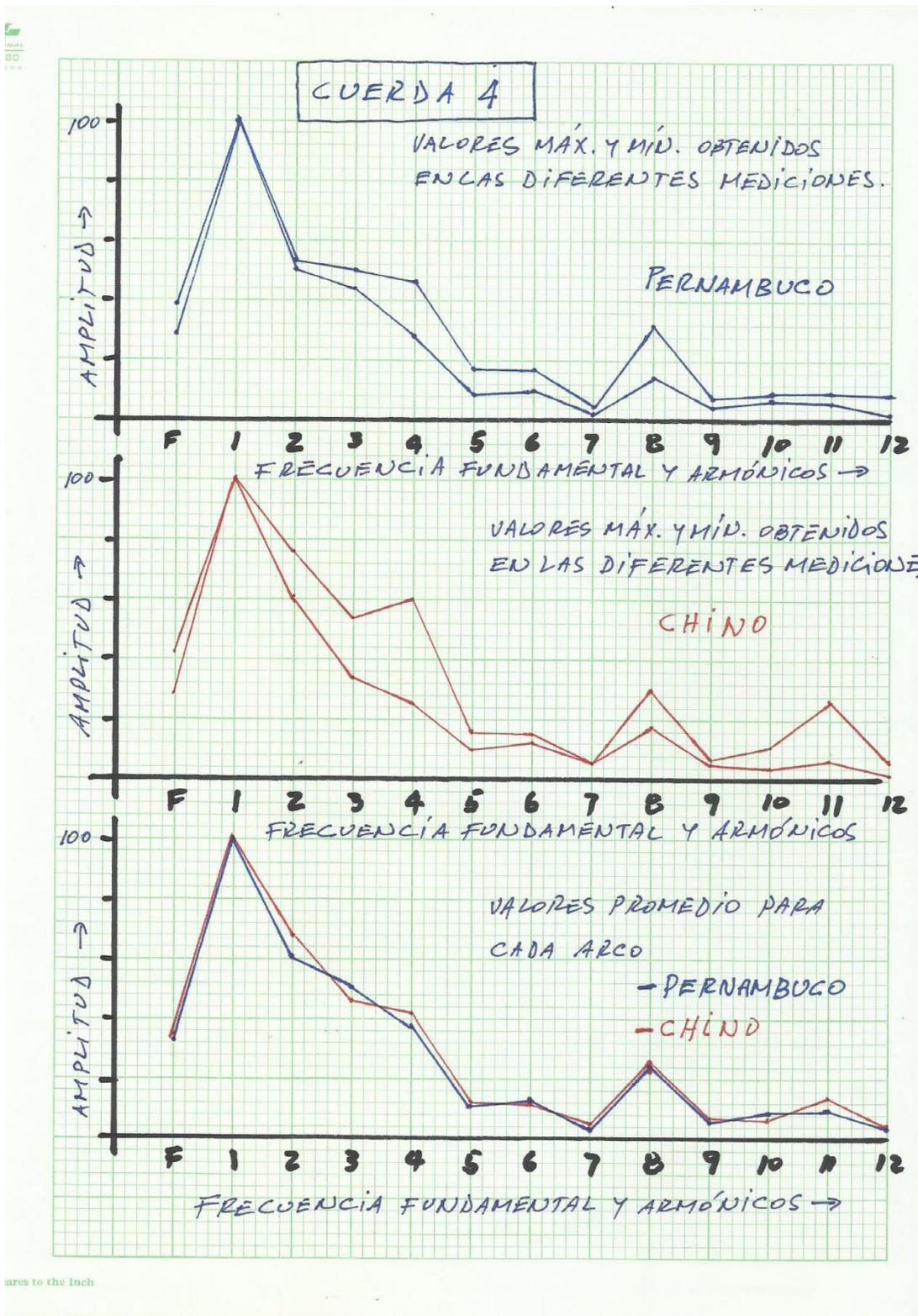


Figura 18. Espectrograma Cuerda 4 Arco de Pernambuco y Arco Chino. Elaboración propia.

Tanto en el oscilograma como en el espectograma, la escala vertical marcada como amplitud no tiene unidades, ya que las amplitudes dependen de la fuerza o intensidad con que se frote la cuerda y en los gráficos de comparación, todas las lecturas se normalizaron de forma tal que las frecuencias fundamentales para la cuerda 1 y 3 llegaran a 100 unidades, mientras que en las cuerdas 2 y 4, se normalizó que su primer armónico llegara a 100 unidades, como puede verse en los gráficos de resumen y comparativos para cada cuerda.

Las figuras 15, 16, 17 y 18, muestran los valores máximos y mínimos registrados para cada arco y cuerda en las diferentes mediciones realizadas (los 2 gráficos superiores), lo que permite conocer las variaciones que se presentan en los distintos armónicos. En el gráfico inferior, se trazaron los valores promedio de cada armónico y frecuencia fundamental, para cada cuerda y arco. A partir de estas gráficas, se puede observar que no existe una diferencia apreciable en los sonidos producidos por los dos arcos.

Por otra parte, en el segundo plano de las mediciones, las cuales fueron hechas en un entorno controlado y según los parámetros acústicos básicos para tomar una medición. Los resultados obtenidos mediante el estudio estadístico, tienen como función principal el brindar una orientación objetiva acerca de si el sonido del Contrabajo se ve modificado al ser interpretado con un Arco de Pernambuco, en comparación con un Arco Chino de madera convencional, esto, para un rango de frecuencias de entre 40 y 400 Hz.

Este estudio estadístico, evalúa por medio de un análisis de varianza, la relevancia de tres diferentes factores influyentes en el proceso de medición. El primero, es el tipo de arco con el que se interpreta, Arco de Pernambuco o Arco Chino. El segundo, hace referencia a la cuerda que se toca, por lo que se tiene que los cuatro niveles del factor cuerda son: Mi, La, Re, Sol. Y el tercero, es una combinación entre arco y cuerda, el cual brindaría información oportuna para determinar la influencia de la esta interacción en el proceso de medición, si esta es relevante o irrelevante.

El análisis de varianza, como se explicó en secciones anteriores, se realiza sobre una tabla de valores obtenidos mediante un software encargado de entregar información en Frecuencia vs Decibeles, esto, para cada una de las 16 grabaciones durante el proceso de medición y para 11 diferentes frecuencias dentro del rango de 40 a 400 Hz (40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315 y 400 Hz).

Los resultados a continuación, serán evaluados de manera independiente, con el fin de determinar la influencia de los tres diferentes factores. Los resultados serán expuestos mediante Diagramas de Pareto y Tablas, de manera tal que se pueda apreciar la relevancia o irrelevancia de cada factor a lo largo de las 16 pruebas, teniendo en cuenta que el índice de confiabilidad es $\alpha = 0.05$, y sabiendo que los factores significativos cumplen con $P \leq \alpha$.

Resultados estadísticos de varianza para 40 H

Para la frecuencia de 40 Hz, después de realizar el análisis de varianza mediante el software Minitab, se obtuvo el Diagrama de Pareto mostrado en la figura 19.

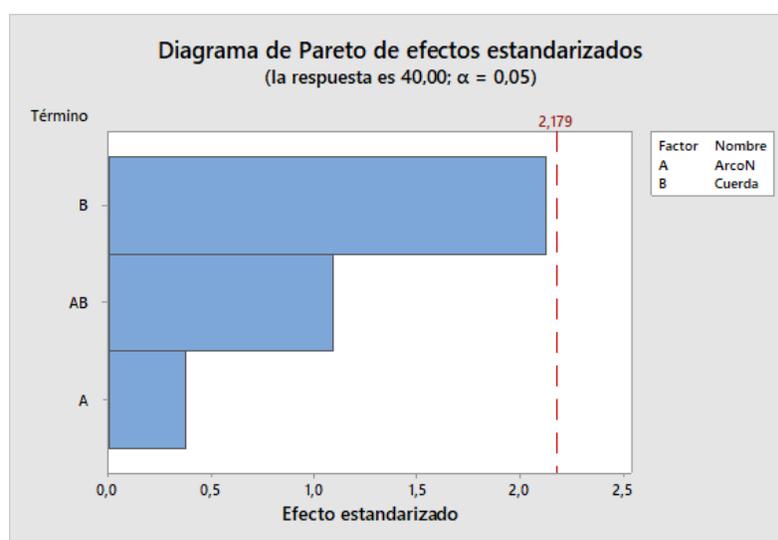


Figura 19. Diagrama de Pareto para 40 Hz. Elaboración propia.

Los resultados mostrados en diagrama, permite ver como el único factor significativo que se acerca a la línea de referencia es el asociado a la cuerda, mientras la variable asociada al arco, como la menos significativa; como se puede observar los valores “P” en la tabla 4:

Tabla 4

Valores P para cada Factor en 40 Hz

| Factor | Valor P |
|-------------|---------|
| Arco | 0,718 |
| Cuerda | 0,055 |
| Arco*Cuerda | 0,298 |

Resultados estadísticos de varianza para 50 Hz

Para la frecuencia de 50 Hz, después de realizar el respectivo análisis de varianza, se obtuvo el Diagrama de Pareto mostrado en la figura 20.

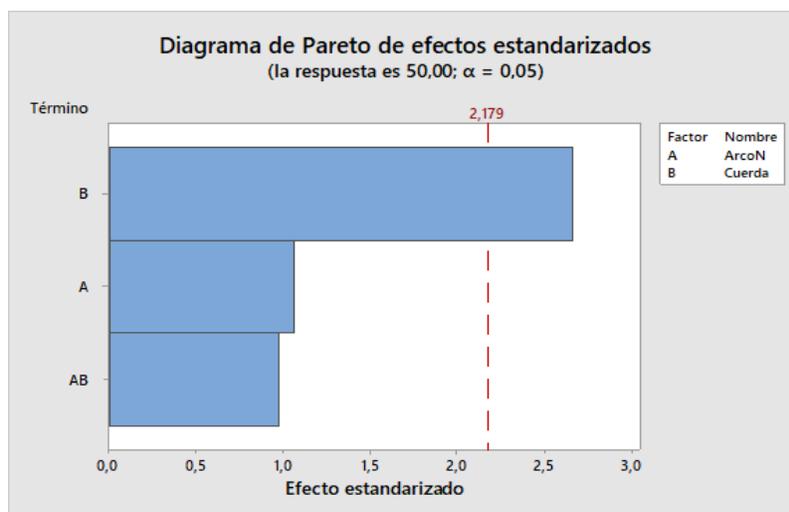


Figura 20. Diagrama de Pareto para 50 Hz. Elaboración propia.

Se puede apreciar que únicamente un factor sobrepasa la línea de referencia, este es el valor dado para la cuerda del instrumento, lo que significa que para esta prueba el único factor significativo es la cuerda, mientras que el arco y la interacción entre cuerda y arco no resultan relevantes para el resultado obtenido; esto puede confirmarse al revisar en la tabla 5 los valores “P” arrojados para cada factor.

Tabla 5

Valores P para cada Factor en 50 Hz

| Factor | Valor P |
|-------------|---------|
| Arco | 0,311 |
| Cuerda | 0,021 |
| Arco*Cuerda | 0,350 |

Resultados estadísticos de varianza para 63 Hz

El análisis de varianza para la frecuencia de 63 Hz puede sintetizarse mediante el Diagrama de Pareto mostrado en la figura 21.

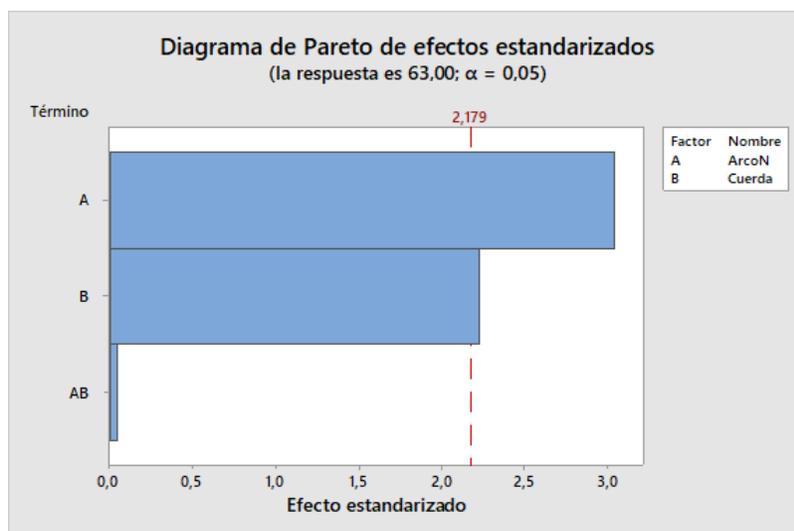


Figura 21. Diagrama de Pareto para 63 Hz. Elaboración propia.

Se puede apreciar que el factor dado para el arco y la cuerda, sobrepasan la línea de referencia, teniendo en cuenta que ninguna de las grabaciones se realizó sobre una frecuencia fundamental de 63 Hz, puede deducirse que existen diferencias sonoras entre uno y otro arco para el contenido armónico en 63 Hz; la relevancia del factor “Arco” puede corroborarse mediante los valores “*P*” obtenidos para cada factor (ver tabla 6).

Tabla 6

Valores P para cada Factor en 63 Hz

| Factor | Valor P |
|-------------|---------|
| Arco | 0,010 |
| Cuerda | 0,046 |
| Arco*Cuerda | 0,967 |

Resultados estadísticos de varianza para 80 Hz

Para la frecuencia de 80 Hz, el análisis de varianza arrojó el Diagrama de Pareto mostrado en la figura 22.

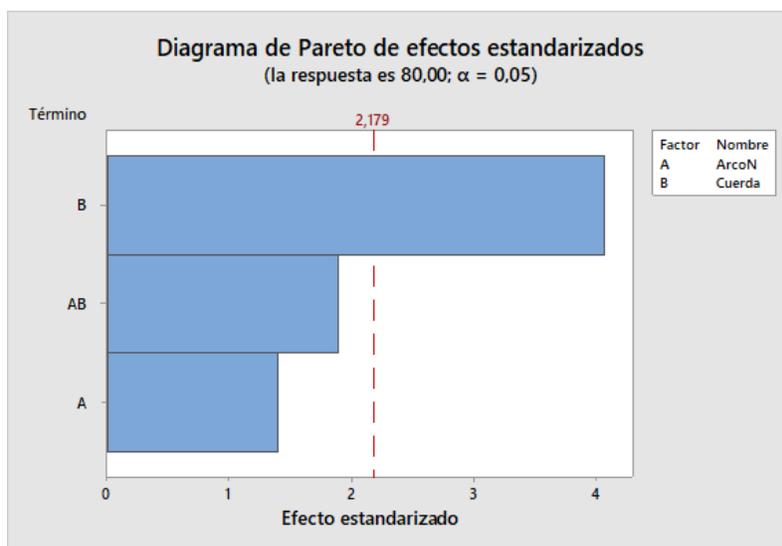


Figura 22. Diagrama de Pareto para 80 Hz. Elaboración propia.

En el anterior diagrama, se puede apreciar que el factor dado para la cuerda del instrumento, sobrepasa la línea de referencia, lo que significa que para esta prueba el único factor significativo es la cuerda, mientras que el arco y la interacción entre cuerda- arco no resultan ser factores relevantes para el resultado obtenido; esto puede confirmarse al revisar los valores “P” arrojados para cada factor (ver tabla 7).

Tabla 7

Valores P para cada Factor en 80 Hz

| Factor | Valor P |
|-------------|---------|
| Arco | 0,189 |
| Cuerda | 0,002 |
| Arco*Cuerda | 0,084 |

Resultados estadísticos de varianza para 100 Hz

Se realizó el análisis de varianza para la frecuencia de 100 Hz, también por medio de Minitab y se obtuvo el Diagrama de Pareto mostrado en la figura 23.

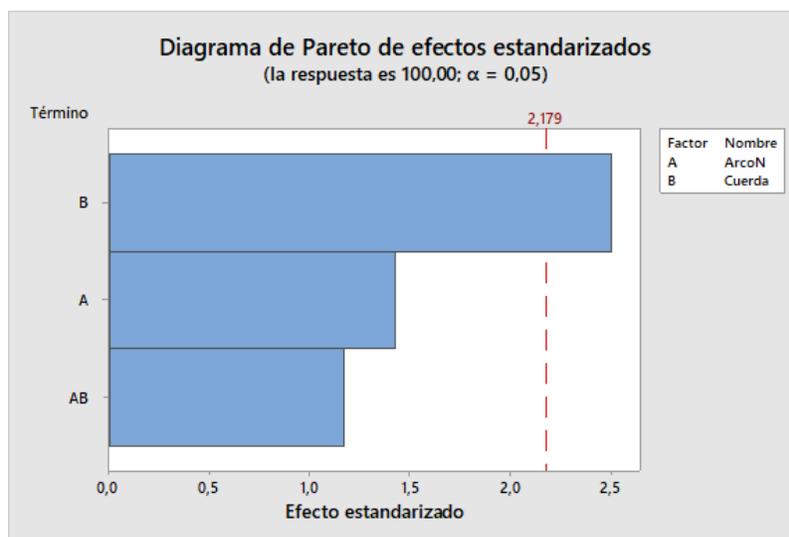


Figura 23. Diagrama de Pareto para 100 Hz. Elaboración propia.

Se puede apreciar que el factor dado para la cuerda del instrumento, es el único que sobrepasa la línea de referencia, lo cual indica que para esta prueba el único factor significativo es la cuerda, mientras que el arco y la interacción entre cuerda-arco no resultan ser factores relevantes para el resultado obtenido; esto puede confirmarse al revisar los valores “P” arrojados para cada factor (ver tabla 8).

Tabla 8

Valores P para cada Factor en 100 Hz

| Factor | Valor P |
|-------------|---------|
| Arco | 0,178 |
| Cuerda | 0,028 |
| Arco*Cuerda | 0,266 |

Resultados estadísticos de varianza para 125 Hz

De igual manera que para las anteriores frecuencias, se realizó el análisis de varianza para la frecuencia de 125 Hz y se obtuvo el diagrama de Pareto mostrado en la figura 24.

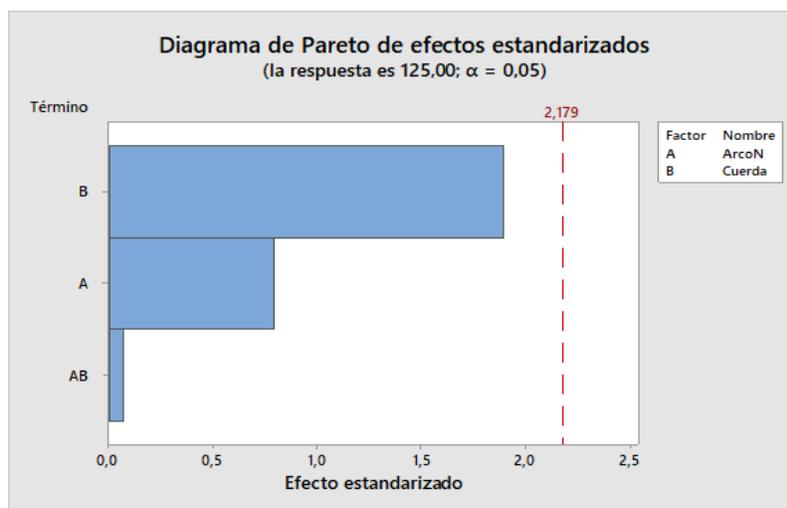


Figura 24. Diagrama de Pareto para 125 Hz. Elaboración propia.

Al observar el comportamiento de los factores, se puede apreciar que el factor dado para la cuerda del instrumento es el que más se acerca a la línea de referencia, lo que significa que para esta prueba no hay factores significativos; esto permite deducir que para la frecuencia de 125 Hz es irrelevante la variación entre cuerda y arco; lo cual puede confirmarse al revisar los valores “P” arrojados para cada factor (ver tabla 9).

Tabla 9

Valores P para cada Factor en 125 Hz

| Factor | Valor P |
|-------------|---------|
| Arco | 0,445 |
| Cuerda | 0,083 |
| Arco*Cuerda | 0,948 |

Resultados estadísticos de varianza para 160 Hz

El análisis de varianza para la frecuencia de 160 Hz, arrojó como resultado el Diagrama de Pareto mostrado en la figura 25, en este se sintetizan los diferentes parámetros evaluados y se dictamina la relevancia de cada uno de los factores en la prueba experimental.

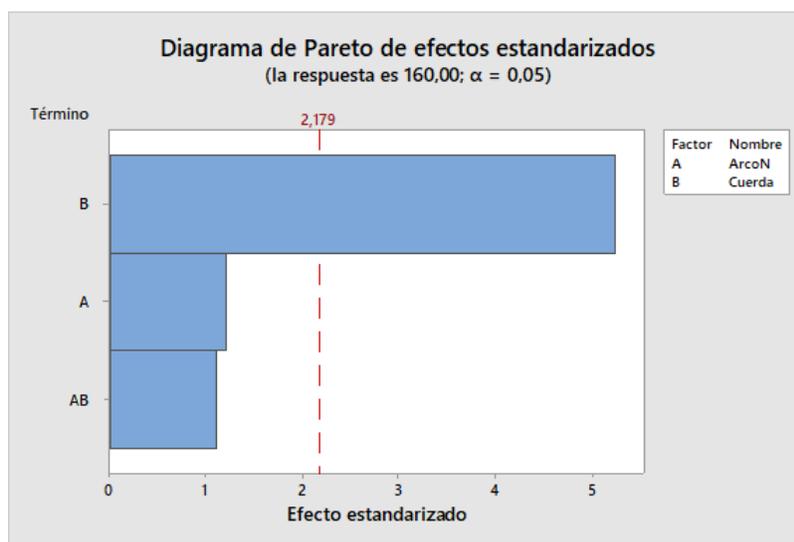


Figura 25. Diagrama de Pareto para 160 Hz. Elaboración propia.

Al igual que para la mayoría de pruebas anteriores, se puede apreciar que para esta prueba el único factor significativo es la cuerda, mientras que el arco y la interacción entre cuerda y arco no resultan ser factores relevantes para el resultado obtenido; esto puede confirmarse al revisar los valores “P” arrojados para cada factor (ver tabla 10).

Tabla 10

Valores P para cada Factor en 160 Hz

| Factor | Valor P |
|-------------|---------|
| Arco | 0,251 |
| Cuerda | 0,000 |
| Arco*Cuerda | 0,291 |

Resultados estadísticos de varianza para 200 Hz

Para la frecuencia de 200 Hz, se realizó también un análisis de varianza, el cual arrojó como resultado el Diagrama de Pareto mostrado en la figura 26.

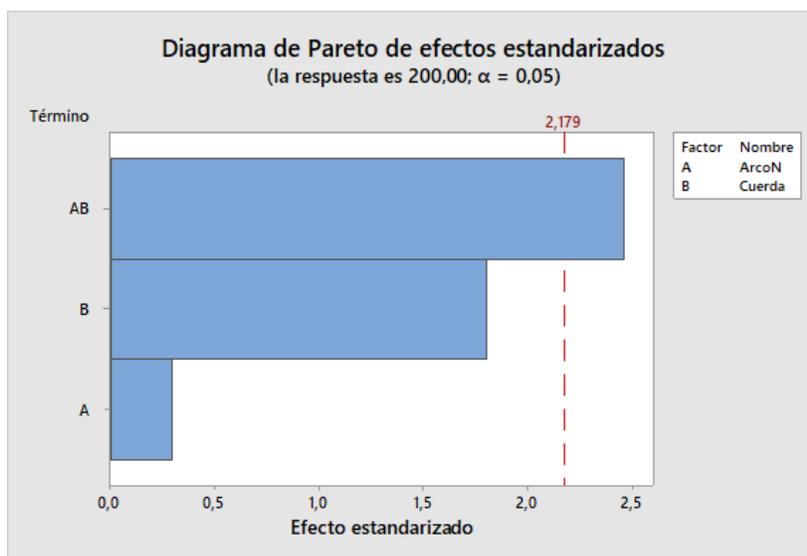


Figura 26. Diagrama de Pareto para 200 Hz. Elaboración propia.

En el diagrama, se puede observar que el factor relevante para esa frecuencia es la interacción entre cuerda y arco, mientras que cuerda y arco de forma independiente, no tienen relevancia de acuerdo con los valores presentados en “P” mostrados en la tabla 11.

Tabla 11

Valores P para cada Factor en 200 Hz

| Factor | Valor P |
|-------------|---------|
| Arco | 0,774 |
| Cuerda | 0,096 |
| Arco*Cuerda | 0,030 |

Resultados estadísticos de varianza para 250 Hz

En la frecuencia de 250 Hz, se realizó también un estudio de varianza para determinar la relevancia de los diferentes factores en los resultados del experimento. Los resultados del estudio de varianza se sintetizan en el Diagrama de Pareto mostrado en la figura 27.

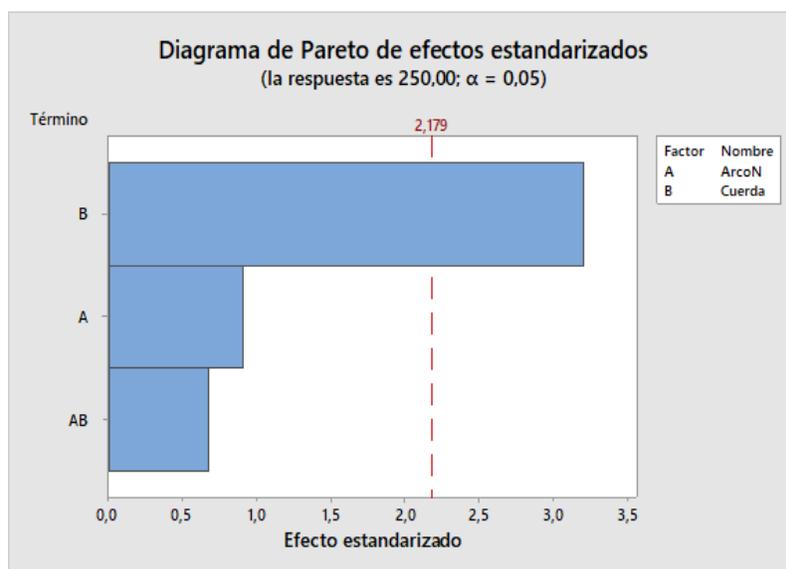


Figura 27. Diagrama de Pareto para 250 Hz. Elaboración propia.

En el diagrama de Pareto mostrado, se puede observar que el factor de la cuerda es el único relevante, ya que es el único que supera la línea de referencia. Por su parte, los factores de arco e interacción entre arco y cuerda, como a lo largo de gran parte de los análisis anteriores, no resultan relevantes (ver tabla 12).

Tabla 12

Valores P para cada Factor en 250 Hz

| Factor | Valor P |
|-------------|---------|
| Arco | 0,387 |
| Cuerda | 0,008 |
| Arco*Cuerda | 0,518 |

Resultados estadísticos de varianza para 315 Hz

Para la frecuencia de 315 Hz se realizó un estudio de varianza; los resultados de tal estudio se sintetizan en el diagrama de Pareto mostrado en la figura 28.

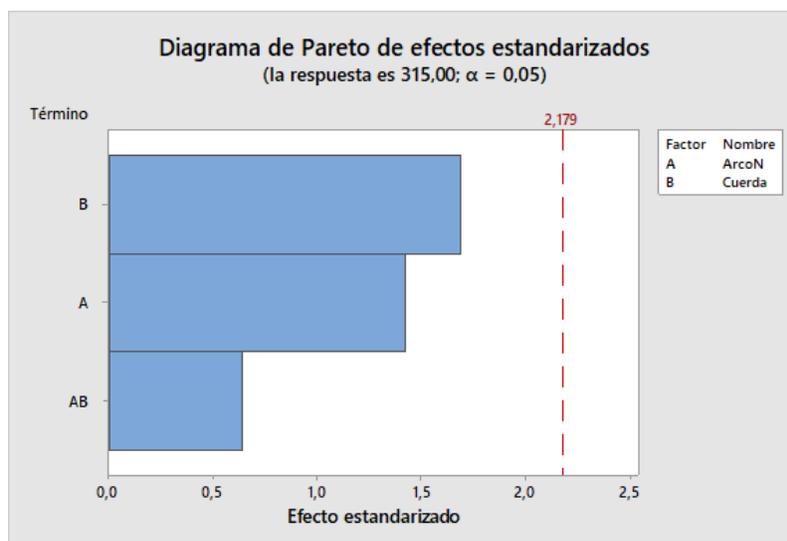


Figura 28. Diagrama de Pareto para 315 Hz. Elaboración propia.

En el diagrama se puede observar que ninguno de los factores resulta relevante en el experimento, esto quiere decir que para la frecuencia de 315 Hz no importa si se varía la cuerda o el tipo de arco. Los resultados para los valores “P” se muestran en la tabla 13.

Tabla 13

Valores P para cada Factor en 315 Hz

| Factor | Valor P |
|-------------|---------|
| Arco | 0,179 |
| Cuerda | 0,117 |
| Arco*Cuerda | 0,536 |

Resultados estadísticos de varianza para 400 Hz

Por último, se analizó la varianza para la frecuencia de 400 Hz y se obtuvo un Diagrama de Pareto, en el cual se sintetizan los datos que indican la relevancia de los factores (ver figura 29).

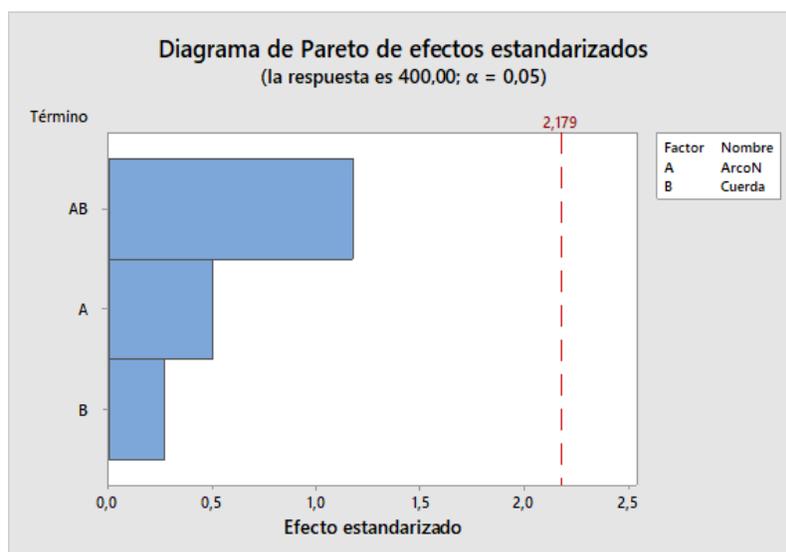


Figura 29. Diagrama de Pareto para 400 Hz. Elaboración propia.

El diagrama indica que para la frecuencia de 400 Hz, ninguno de los factores evaluados resulta relevante, al igual que para las frecuencias de 125 Hz y 315 Hz, se puede decir que no importa ni la cuerda accionada ni el tipo de arco con el cual se interpreta. Los resultados para el valor “*P*” se muestran en la tabla 14:

Tabla 14

Valores *P* para cada Factor en 400 Hz

| Factor | Valor P |
|-------------|---------|
| Arco | 0,625 |
| Cuerda | 0,792 |
| Arco*Cuerda | 0,263 |

A manera de análisis global, vale la pena destacar que a lo largo del análisis estadístico llevado a cabo, el factor más relevante e influyente en el sonido del Contrabajo es la cuerda. Para el factor “Arco”, puede inferirse que su relevancia en el sonido del Contrabajo es baja y que únicamente para el contenido armónico en 63Hz, se presenta influencia de su parte.

Discusión y Conclusiones

Las diferencias entre el Arco de Pernambuco y el Arco Chino convencional, obedecen más a características físicas, pues los cambios sonoros en el contrabajo al usar uno u otro, son casi imperceptibles. Tenemos entonces que, aspectos como el peso, la longitud, el balance, la densidad y la tensión de las cerdas, a pesar de que ésta última se homologó en ambos arcos debido a las mediciones acústicas, son diferentes en ambos arcos, por lo cual, se puede decir que el Arco de Pernambuco tiene unas características físicas que favorecen una comodidad y mejor respuesta para los diferentes golpes de arco y la interpretación en general del instrumento.

A lo anterior, James (2002) menciona que muchas veces no se está familiarizado con la distinción que hay entre el balance o centro de gravedad de un arco y su peso, pues comúnmente un centro cerca de la punta, es catalogado como un arco pesado, mientras que un centro cercano a la nuez, es considerado un arco liviano. Este autor, menciona que la única manera en que se puede obtener una medida exacta, es pesando el arco, mientras que para el balance, es preciso sostenerlo en las manos y moverlo hasta obtener el equilibrio del arco.

Sin embargo, este asunto va más allá de saber distinguir entre peso y balance, se trata de saber distinguir la funcionalidad del uno y del otro en el momento de tocar. Un centro de gravedad lejano a la nuez, disminuye el control sobre el arco y aumenta el esfuerzo de la mano, pues el arco al ser sostenido, naturalmente se genera un torque en dirección al suelo por su peso, entonces si el centro de gravedad tiende a estar lejano de la nuez, éste va a favorecer el torque. Una manera de compensar esta situación, es acercar el centro de gravedad del arco a la nuez, para compensar el esfuerzo de la mano sobre el torque generado, de manera que puede brindar mucho más control y disminuir el esfuerzo por mantener el arco en una posición horizontal o que luego de ejecutar ciertos golpes de arco, éste se puede reubicar fácilmente.

De igual forma, se puede abstraer que además del peso y el balance, las otras características como la longitud, la densidad, la elasticidad, la tensión y la curvatura, son aspectos que por minúsculo que sea el detalle, contribuyen con lo que subjetivamente califica el instrumentista como “manejabilidad” o “comodidad” del arco. Y quizá ésta última, sea la diferencia que puede marcar una distinción entre un arco y el otro, pues es desde la interacción y conocimiento del instrumento, que un músico construye gran parte de su sonoridad.

También, se puede concluir que el sonido del contrabajo, depende principalmente de su fabricación y de las características de sus cuerdas, pero, existen unas variaciones mínimas en el contenido armónico cercano a 63 Hz, las cuales pueden ser inducidas por la utilización de uno u otro tipo de arco, claro que esto es para el procedimiento llevado a cabo en este estudio.

Finalmente, queda como sugerencia general, el seguir explorando este tipo de investigaciones que puedan involucrar aspectos que no se abordaron aquí, tales como la toma de mediciones con diferentes golpes de arco (*spiccato, martelé, stacatto, sautille, ricochet*), probar la respuesta de los arcos con diferentes tipos de colofonias, realizar mediciones con cerdas distintas (blancas, marrones y negras) y sobretodo, que el lugar de las mediciones tenga las mejores condiciones acústicas posibles, es decir, que tenga la capacidad de absorber en su totalidad las reflexiones producidas por ondas acústicas o electromagnéticas y que se encuentre aislada de cualquier influencia sonora del exterior.

Referencias

- Beranek, L. (1969). *Acústica* (Adolfo di Marco trad.) [Segunda edición]. Buenos Aires Argentina: Editorial Hispano Americana S.A. Recuperado de:
https://monoskop.org/images/7/7d/Beranek_Leo_L_Acustica_Spanish.pdf
- Boyden, D.D. (1990). *The History of Violin Playing from its Origins*. New York, United States: Oxford University Press Inc.
- Cabrera, J.G. (2010). *Acústica y Fundamentos del Sonido (E-Learning)* [módulo pedagógico]. Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Bogotá, Colombia.
- Cardús, C. (1996). *Estructura y Sonoridad de los Instrumentos de Arco*. Madrid, España: Real Musical.

- Carvajal, C.M. (2008). *Una Propuesta Didáctica para la Enseñanza de las Magnitudes Masa y Peso en la Educación Básica* [trabajo de pregrado]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. Recuperado de:
<http://ayura.udea.edu.co:8080/jspui/bitstream/123456789/937/1/JC/0489.pdf>
- Electrofante.com (s/f). Recuperado de:
<https://www.analfatecnicos.net/archivos/57.TablasEcuacionElectrofante.pdf>
- Elisei, N. G. (2012). Análisis Acústico de la Voz Normal y Patológica utilizando dos sistemas diferentes: ANAGRAF y PRAAT. *Interdisciplinaria*, 29(2), pp. 339 – 357.
- Everest, F.A. & Polhmann, K.C. (2009). *Master Handbook of Acoustics*. New York, United States of America: Mc Graw Hill.
- Ferro, C.A. (2011). *Obtención de Patrones de Radiación de: Guitarra eléctrica, Bajo eléctrico, Flauta dulce y Bongó* [trabajo de pregrado]. Instituto Politécnico Nacional, México D.C.
- Heron-Allen, E. (2005). *Violin-Making. A Historical and Practical Guide*. New York, United States of America: Dover Publications, Inc.
- James, J. (2002). *Practical Acoustics of Instruments of the Violin Family (Bridging Science and Art)* [First English Edición]. Oregon, United States of America: Henry Strobel, Violin Maker & Publisher. Recuperado de:
https://www.henrystrobel.com/chapter_7_the_bow.pdf
- Luthier, Miguel Mateo (14 de junio de 2015). ¿Cómo debe ser un arco bueno? [publicación de un blog]. Miguel Mateo Luthier [Blog]. Recuperado de:
<https://www.miguelmateoluthier.com/bloq-miguel-mateo-luthier/>
- Moral, J.A. (2000). Psicoacústica y acústica musical. *Revista de Psicodidáctica*, (9), p. 1 – 11. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/pdf/175/17500913.pdf>
- Planyavsky, A. (1998). *The Baroque Double Bass Violone* (James Barket, trad.). London, England: The Scarecrow Press, Inc. (Original publishing in 1970).
- Rodríguez, S.E. & Guarín, N. (2013). Introducción a la Acústica de la Bandola Andina Colombiana. *Ricercare*, (1), pp. 111 – 126.

Rossing, T.D., Wheeler, P. & Moore, F.R. (2002). *The science of sound*. San Francisco, United States of America: Addison Wesley.

Sanjurjo, D. & Garzón, L. (2016). *La Terapia Floral y la Teoría Musical*. Naucaplan, México: Innovación Editorial Lagares de México, S.A. Recuperado de:
<http://reader.digitalbooks.pro/book/preview/42812/Legal?1557144133828>

Scott, H. K. (2008). Finding the best bow for your job. Know your stick. *Strings*, 22(156), pp. 59 – 63.

Stowell, R. (1992). *The Cambridge Companion of the Violin*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.

Wikipedia (12 de marzo de 2019). *Tronco de pirámide*. Recuperado de:
https://es.wikipedia.org/wiki/Tronco_de_pir%C3%A1mide