

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

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



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA POLITÈCNICA
SUPERIOR DE GANDIA

**“Diseño y estudio de un transductor
de superficie externo en
instrumentos musicales con caja de
resonancia”**

TRABAJO FINAL DE GRADO

Autor/a:

Víctor Cutanda Pobo

Tutor/a:

Jesús Alba Fernández

Romina M.^a Del Rey Tormos

GANDÍA, 2019

Resumen

En este proyecto se plantea el diseño, montaje y estudio de un dispositivo dotado de un transductor de vibraciones que pueda acoplarse a un instrumento de cuerda. Este transductor será capaz de transmitir vibraciones a la tapa de la caja de resonancia del instrumento de cuerda, y generar así un sonido amplificado, que podrá escucharse al mismo tiempo que el/la intérprete toque. El proyecto se centrará en el acoplo y puesta a punto del dispositivo en una guitarra, pero la idea es que pueda acoplarse a otros como el ukelele.

Para llevar a cabo la idea principal, será necesario diseñar un circuito eléctrico capaz de ser autónomo y transportable, que pueda funcionar de manera inalámbrica y relativamente barato. También habrá que realizar el diseño de un armazón capaz de albergar toda la electrónica y acoplar el transductor a la superficie deseada.

El sistema construido estará dotado de un amplificador con conexión *bluetooth* y una entrada Jack 3.5 mm estándar que permitirá reproducir con la caja del instrumento bases rítmicas, melódicas o cualquier otro sonido que pueda serle útil al músico, como si de un altavoz se tratara.

Una vez realizado el montaje, se realizará un estudio de caracterización y respuesta en frecuencia del transductor en diferentes materiales que puedan utilizarse como tapa de la caja de resonancia. Por último, se estudiará cómo afecta este transductor a una guitarra acústica, valorando si se cumple el objetivo de poder reproducir con la tapa, aprovechando la caja de resonancia, al mismo tiempo que el músico toca.

Palabras clave: Electroacústica, guitarra acústica, transductor, vibración, diseño3D.

Abstract

This project will propose the design, assembly and study of a device equipped with a vibration transducer that can be attached to a string instrument. This transducer will be capable of transmitting vibrations to the top of the resonance box of the instrument, and thus generate an amplified sound, which can be heard at the same time that the interpreter plays. The project will focus on the coupling and tuning of the device on a guitar, but the idea is that it can be coupled to others such as the ukulele.

To carry out the main idea, it will be necessary to design an electrical circuit capable of being autonomous and transportable, able of operating wirelessly and relatively cheap. It will also be necessary to design a frame capable of housing all the electronics and attaching the transducer to the desired surface.

The built system will be equipped with an amplifier with bluetooth connection and a 3.5 mm Jack input that will allow to play rhythmic, melodic bases with the instrument box or any other sound that may be useful to the musician, as any speaker would.

Once assembled, a study of characterization and frequency response of the transducer will be performed in different materials. In particular, it will be studied how this transducer affects an instrument with a soundboard like the acoustic guitar.

Once the assembly is done, a study of the characterization and frequency response of the transducer will be carried out in different materials that can be used as a cover of the soundboard. Finally, it will be studied how this transducer affects an acoustic guitar, assessing whether the objective of being able to play with the cover is fulfilled, taking advantage of the soundboard, at the same time that the musician plays.

Key words: Electroacoustic, acoustic guitar, transducer, vibration, 3D design.

Índice de contenido

1. Introducción y objetivos	6
2. Elección de los materiales y diseño previo del sistema electrónico.....	8
2.1. Baterías	8
2.2. Elevador de tensión	9
2.3. Amplificador.....	9
2.4. Transductores.....	10
2.5. Interruptor y toma CC	11
3. Montaje previo, soldado de los componentes y prueba preliminar	12
4. Diseño del sistema de anclado, impresión 3D e integración de la electrónica.....	14
5. Caracterización electroacústica y toma de medidas en anecoica	17
5.1. Caracterización electroacústica con LIMP	18
5.1.1. Procedimiento de medición.....	18
5.1.2. Procedimiento práctico de medición	19
5.1.3. Obtención de parámetros Thiele-Small.....	21
5.1.4. Resultados en transductor sin carga añadida (en aire libre)	23
5.1.5. Resultados en transductor con carga añadida (masa termofusible).....	24
5.1.6. Resultados en transductor con carga añadida (moneda y termofusible).....	26
5.1.7. Parámetros de Thiele-Small con el método de la carga añadida	27
5.2. Toma de medidas en cámara anecoica	29
5.2.1. Ruido rosa en LoudPanel de 5 mm de grosor y 15 x 15 cm.....	31
5.2.2. Ruido rosa en madera DM de 5 mm de grosor y 15 x 15 cm	33
5.2.3. Ruido rosa en madera DM de 3 mm de grosor y 15 x 15 cm	35
5.2.4. Comparativa entre los 3 materiales	36
5.3. Ruido rosa en 3 puntos de la guitarra	38
6. Comparativa de datos, observación subjetiva y objetiva de los resultados	42
7. Conclusiones y futuras líneas de estudio	44
8. Referencias	47

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Baterías empleadas en el dispositivo	8
Ilustración 2. Módulo de carga-descarga	8
Ilustración 3. Elevador de tensión Step Up	9
Ilustración 4. Amplificador TDA7492P	9
Ilustración 5. Transductor 3 W	10
Ilustración 6. Transductor 25 W	10
Ilustración 7. Interruptor y toma CC	11
Ilustración 8. Toma de corriente continua	11
Ilustración 9. Boceto de circuito eléctrico	12
Ilustración 10. Componentes electrónicos conectados.....	12
Ilustración 11. Detalle del prototipo en cartón	13
Ilustración 12. Diseño 3D listo para imprimir	14
Ilustración 13. Proceso de impresión de la pieza principal	15
Ilustración 14. Dispositivo impreso y con los componentes incluidos	16
Ilustración 15. Vista del conector CC y la entrada Jack 3.5.....	16
Ilustración 16. Puntos elegidos para colocar el transductor.....	17
Ilustración 17. Sistema eléctrico para medir la impedancia	18
Ilustración 18. Montaje listo para realizar la medición en LIMP	20
Ilustración 19. Panel de calibrado de la tarjeta de sonido	20
Ilustración 20. Transductor con las diferentes cargas a medir.....	22
Ilustración 21. Transductor sin carga	23
Ilustración 22. Curva de impedancia del transductor sin carga	23
Ilustración 23. Transductor con carga de material termofusible	24
Ilustración 24. Curva de impedancia con la carga del material termofusible	25
Ilustración 25. Curva de impedancia sin carga y con carga del material termofusible	25
Ilustración 26. Transductor con carga de material termofusible y una segunda carga.....	26
Ilustración 27. Curva de impedancia del transductor con dos cargas.....	26
Ilustración 28. Pesaje de las dos cargas utilizadas	27
Ilustración 29. Curvas de impedancia con material termofusible y con las dos cargas.....	27
Ilustración 30. Parámetros Thiele-Small con el método de la masa añadida.....	28
Ilustración 31. Croquis del montaje realizado para medir en la cámara anecoica	29
Ilustración 32. Imagen real del montaje realizado	30
Ilustración 33. Generador de ruido rosa en el centro externo a la cámara anecoica	30
Ilustración 34. LoudPanel y su disposición en la cámara para la medición	31
Ilustración 35. Madera DM 5 mm y su disposición en la cámara para la medición	33
Ilustración 36. Madera DM de 3 mm y su disposición en la cámara para la medición	35
Ilustración 37. Posición y numeración de los puntos a estudiar en la guitarra	39
Ilustración 38. Montaje realizado para la medición de la guitarra	39
Ilustración 39. Dos de los tres puntos medidos en la guitarra	40
Ilustración 40. Dibujo ilustrativo para conectar un bajo eléctrico.	44
Ilustración 41. Dibujo ilustrativo para conectar una pedalera	45

Índice de gráficas

Gráfica 1. Curvas obtenidas en LoudPanel 5 mm	32
Gráfica 2. Curvas obtenidas en madera DM de 5 mm.....	34
Gráfica 3. Curvas obtenidas en madera DM de 3 mm.....	35
Gráfica 4. Curvas del punto 1 de las 3 planchas	36
Gráfica 5. Curvas del punto 2 de las 3 planchas	37
Gráfica 6. Curvas del punto 3 de las 3 planchas	38
Gráfica 7. Curvas obtenidas de la guitarra	40
Gráfica 8. Comparativa del punto 1 de las planchas y la guitarra.....	42

1. Introducción y objetivos

Este proyecto nace originalmente con la idea de aumentar la funcionalidad de un instrumento de cuerda, una guitarra, proponiendo un dispositivo electroacústico capaz de utilizar la caja de resonancia de la guitarra y hacerla vibrar como si de un altavoz convencional se tratara.

Este sistema pretende ser un accesorio para el músico, algo de lo que servirse si lo necesita, teniendo como fin principal sustituir algunos sistemas de amplificación externos y que sea el propio cuerpo del instrumento el que emita los sonidos deseados. La base de este dispositivo es un transductor capaz de hacer vibrar la tapa de la guitarra y de esa manera aprovechar la caja de resonancia del instrumento.

Un transductor es un dispositivo que recibe una energía de una naturaleza y la transforma en otra diferente. En el caso que nos ocupa es necesario un transductor electroacústico, que convierta la señal eléctrica en acústica. La señal eléctrica genera transformaciones mecánicas que al contacto con un medio produce una señal acústica. Los transductores electroacústicos más comunes y conocidos son los altavoces, que transforman una señal eléctrica en una de presión sonora, haciendo uso de un cono o superficie que moverá el aire y generará diferentes niveles de presión que nuestro oído interpretará como sonido.

En este caso, el transductor que se utilizará no está provisto de un cono; en su lugar se encuentra un pequeño pistón que transferirá las vibraciones generadas por él a cualquier superficie que se desee, convirtiendo esta última en algo similar a la membrana de un altavoz, que además aprovechará la caja de resonancia del instrumento de cuerda.

El **objetivo** principal de este trabajo es realizar el diseño completo, montaje y estudio de una guitarra acústica a la que se dota de un transductor por vibración. Cada superficie tiene unas propiedades y características diferentes a la hora de transmitir vibraciones. La posición del transductor, el tipo de material, su forma, su espesor, su manera de estar fijado, etc. van a condicionar el sonido final. Sólo en el caso de la posición, se sabe que se pueden excitar diferentes modos de la superficie, “coloreando” el sonido de forma distinta. Para el diseño debe tenerse cuenta que el material más común de la tapa de la guitarra es la madera, y que en fase previa sería conveniente ver si el transductor de vibraciones que se diseñe funciona adecuadamente sobre ella.

Siguiendo una **metodología** centrada en el diseño, montaje y análisis de comportamiento del dispositivo, se han planificado cinco **fases** que se describen a continuación:

Fase 1: Elección de los materiales y diseño previo del prototipo electroacústico para la generación de vibraciones.

Fase 2: Montaje previo, soldado de los componentes y pruebas preliminares: comprobación de las conexiones, potencia y la buena transmisión de los diferentes transductores de vibración a superficies de referencia.

Fase 3: Diseño de un sistema de anclado, impresión 3D e integración de la electrónica en un espacio reducido para fijar el transductor en el instrumento deseado.

Fase 4: Caracterización electroacústica y toma de medidas en anecoica.

Fase 5: Comparativa de datos, observación subjetiva y objetiva de los resultados.

2. Elección de los materiales y diseño previo del sistema electrónico

El dispositivo propuesto tiene que poder ser portátil, por lo que tendrá que incluir unas baterías. También llevará un amplificador capaz de alimentar al transductor (alimentado a 12 voltios). Esto hace que, puesto que las baterías de litio tienen una tensión nominal de 3.7 voltios, sea necesario un módulo capaz de elevar la tensión de esos 3.7 voltios a los 12 voltios requeridos por el amplificador. También serán necesarios otros componentes: un módulo cargador con protección de sobrecarga para baterías y conexión micro USB, un pequeño interruptor y, por supuesto, elegir un transductor que sea adecuado.

2.1. Baterías

Para este fin, se ha decidido reutilizar una vieja *power bank* o batería portátil que funcionará perfectamente para el uso requerido. Además, estas baterías incorporan el módulo de carga-descarga con protección de sobrecarga y conexión micro USB. A continuación, se pueden observar las partes obtenidas de este despiece (*Dx Dealextrême, 2019*):



Ilustración 1. Baterías empleadas en el dispositivo



Ilustración 2. Módulo de carga-descarga

2.2. Elevador de tensión

El convertidor DC-DC elevador de tensión Step Up será el encargado de elevar el voltaje de salida de las baterías conectadas en paralelo 3.7 V al necesario para que el amplificador posterior funcione otorgándole una tensión continua de 12 voltios.

Estos módulos son capaces de eliminar la diferencia de tensión en las baterías de litio, entre 4.3 V y 3.6 V dependiendo del nivel de carga, en un voltaje constante de entre 10 y 24 voltios que puede variar según las necesidades.

A continuación, se muestra el módulo donde se pueden ver sus conexiones de voltaje de entrada Vin y el de salida Vout:



Ilustración 3. Elevador de tensión Step Up

2.3. Amplificador

El amplificador es el encargado de recibir las señales de audio, amplificarlas y enviarlas al transductor. Después de valorar diferentes opciones para este proyecto se ha decidido utilizar un *DollaTeck Bluetooth CSR4.0* con el chip amplificador TDA7492P. Se trata de un amplificador bluetooth con entrada Jack 3.5 mm capaz de trabajar entre 10 y 25 voltios y con dos salidas de 25 W y 8 Ω . Aunque el proyecto final solo va a tener un transductor, en un principio se barajó la idea de poner dos de ellos. En caso de que con el tiempo fallara un canal, todavía quedaría el otro para funcionar.



Ilustración 4. Amplificador TDA7492P

2.4. Transductores

Los transductores son los encargados de transmitir las vibraciones a los cuerpos deseados. Originalmente no se conocía el comportamiento de estos dispositivos, por lo que, dentro de un tamaño y características, se decidió comprar dos modelos distintos con diferentes potencias para valorarlos.

Primeramente, se probaron unos transductores pequeños que ayudarían a que el producto final fuera más pequeño y ligero. Estos transductores tenían una potencia de 3 vatios cada uno y 4Ω .



Ilustración 5. Transductor 3 W

Las prestaciones que aportaban estos pequeños transductores no eran las esperadas, pues no generaban la suficiente energía ni espectro necesarios para la guitarra, por lo que fueron apartados del proyecto.

La segunda opción, más eficaz, fue un transductor mucho más potente y de mayor tamaño que los anteriores. Este tenía una potencia de 25 vatios y 8Ω y sí otorgaba al proyecto las prestaciones requeridas. Además, era compatible con el amplificador nombrado anteriormente de $2 \times 25 \text{ W}$ y 8Ω .



Ilustración 6. Transductor 25 W

2.5. Interruptor y toma CC

Son dos elementos extra añadidos al proyecto que harán las funciones de corte y entrega de suministro eléctrico por parte de las baterías al circuito. En el caso del interruptor, y por parte de conector hembra externo, dispondremos de una toma externa donde enchufar una corriente más duradera que las baterías para largas jornadas de uso.



Ilustración 7. Interruptor y toma CC



Ilustración 8. Toma de corriente continua

3. Montaje previo, soldado de los componentes y prueba preliminar

Una vez se dispuso de todos los componentes, hubo que realizar un montaje preliminar para comprobar el correcto funcionamiento. Para ello se procedió a la tarea de soldado y conexión de todos ellos guiándose por el circuito preliminar diseñado.

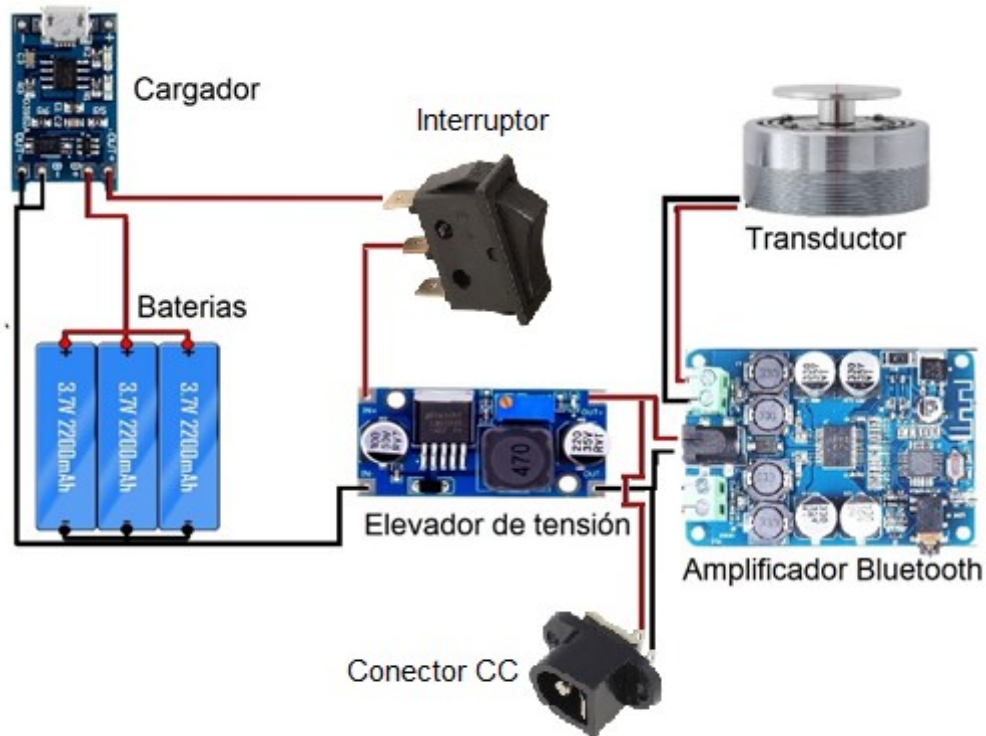


Ilustración 9. Boceto de circuito eléctrico

Con todo conectado, el circuito mostraba el siguiente aspecto:

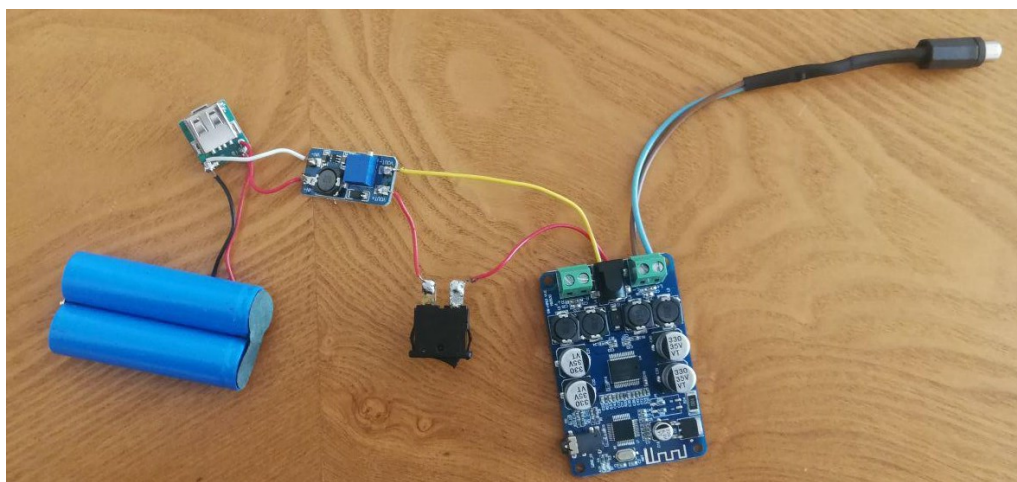


Ilustración 10. Componentes electrónicos conectados

De izquierda a derecha se pueden observar las baterías, el módulo de carga-descarga micro USB, el elevador de tensión, interruptor, amplificador y una conexión RCA para agilizar la conexión desconexión del transductor.

Llegados a este punto y comprobado que el circuito funciona correctamente, se decide integrarlo todo en un espacio reducido que ayudará además a visualizar y tomar medidas a la hora del realizar el diseño 3D. Este proceso se llevó a cabo realizando una carcasa de cartón (para pruebas únicamente) y colocando los componentes donde mejor convenía.

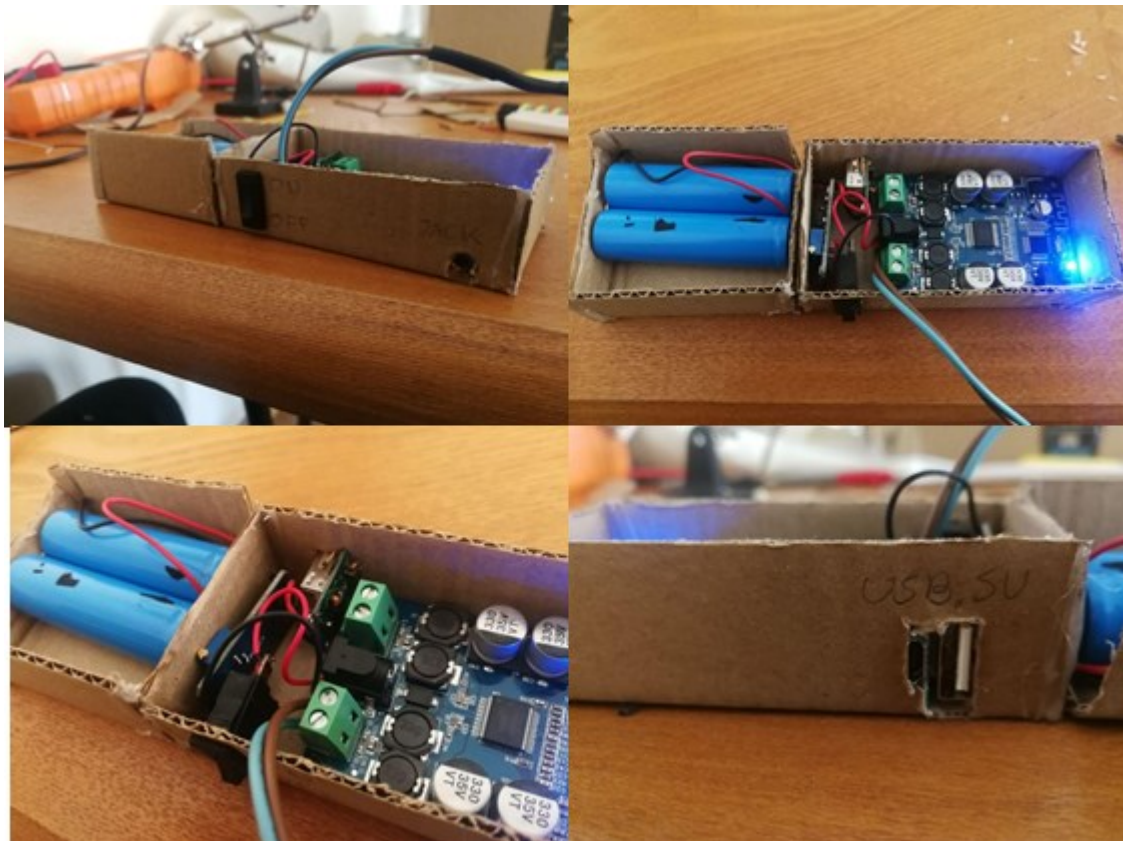


Ilustración 11. Detalle del prototipo en cartón

Con este prototipo se hicieron diferentes pruebas simples que ayudarían a afianzar el rumbo del proyecto. Las pruebas simples consistieron en probar el transductor en diferentes superficies y comprobar su comportamiento y calidad.

4. Diseño del sistema de anclado, impresión 3D e integración de la electrónica

En esta fase se diseña un sistema de anclado que permita albergar toda la electrónica en un espacio reducido y a la vez fijar el transductor en el instrumento deseado. Para anclar toda esta electrónica a una guitarra es necesario un soporte que sea capaz de albergar toda la electrónica, el transductor y que además asegure un correcto contacto de este último con la superficie deseada, en este caso la tapa de una guitarra. Por ello se decide diseñar una estructura de tipo "U" que sea capaz de ajustarse a diferentes grosores.

Como la idea principal admite diferentes tamaños y grosores de guitarra se decide realizar un carril hueco por el que se desplazará otro de forma que el grosor del instrumento o superficie pueda variar desde 0 cm hasta 11 cm. La parte móvil debe ir sujeta a la parte fija con algún tipo de tensor que asegure el correcto contacto con la superficie deseada, y para este fin se decide diseñar unos salientes a la estructura que sujetaran unas gomas elásticas.

Para albergar la electrónica y reducir el tamaño, se realiza una caja anexa a la estructura lo más pequeña posible; el hueco del transductor también se realiza ajustado pero sólido puesto que va a recibir cierta presión.

Ayudado del prototipo anterior, se toman medidas y se procede a realizar el diseño 3D que incluirá todos los componentes mencionados y algunos rebajes para incrustar el cableado. Haciendo uso del programa AUTODESK FUSION 360 (Autodesk, 2019) se realiza el diseño. Tras un par de sesiones, se decide alterar el grosor de algunas zonas del diseño y se envía a imprimir las siguientes piezas:

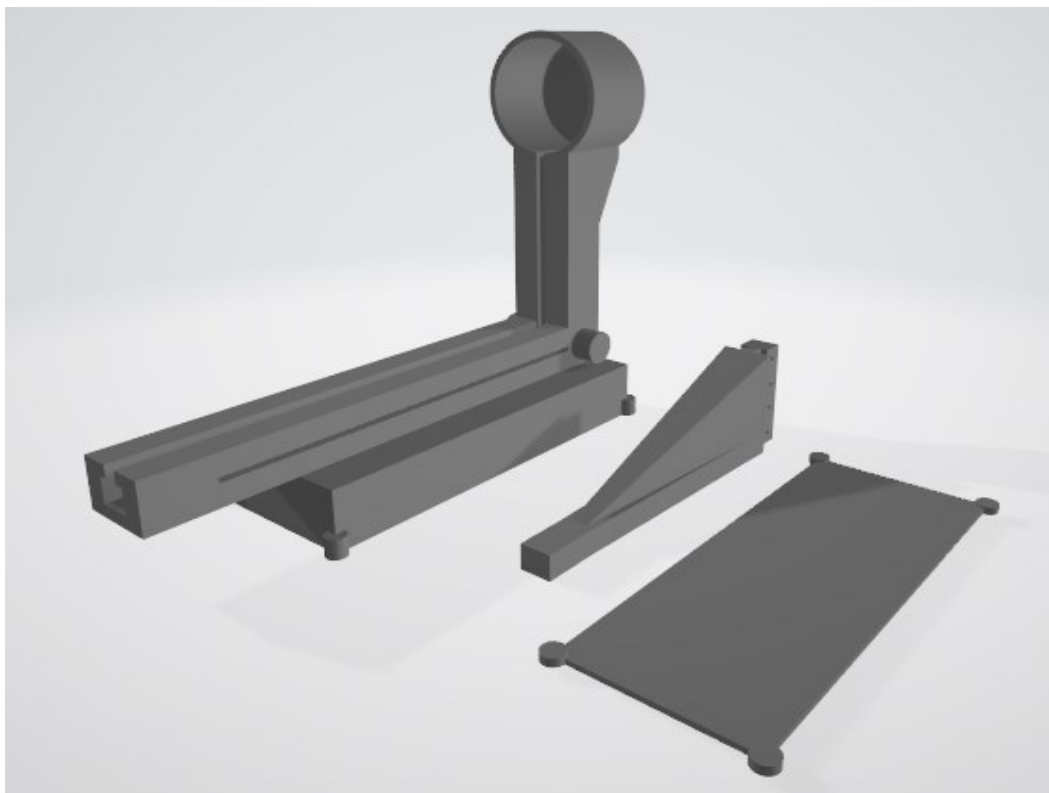


Ilustración 12. Diseño 3D listo para imprimir

En la *Ilustración 12* se pueden apreciar de izquierda a derecha la parte fija, que alberga el transductor y la caja para la electrónica, la parte móvil que se deslizará por el interior de la parte fija y la tapa de la caja que hará las veces de protector.

Una vez impreso el diseño, se realiza el montaje de la electrónica en su interior.

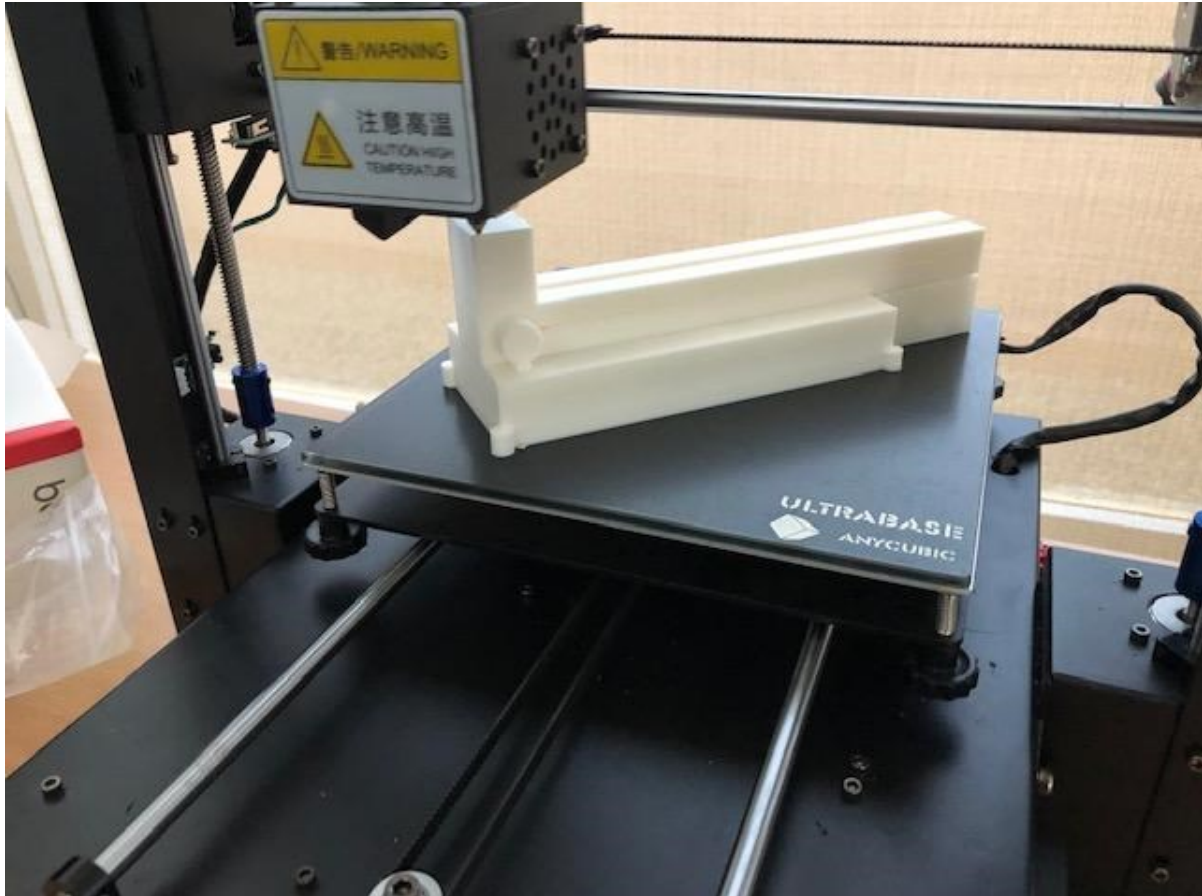


Ilustración 13. Proceso de impresión de la pieza principal

Tras limpiar el sobrante y realizar algunos agujeros para conexiones, cableado y el interruptor, el dispositivo muestra el siguiente aspecto:

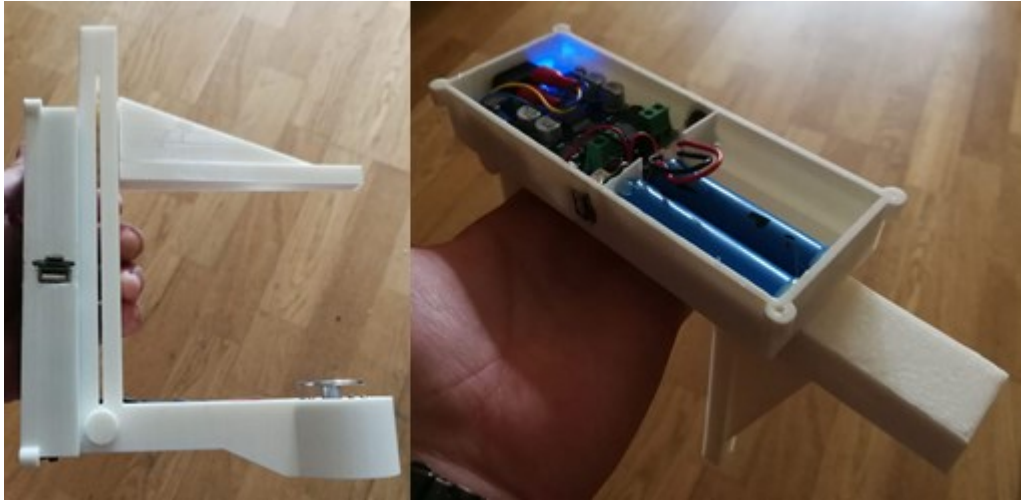


Ilustración 14. Dispositivo impreso y con los componentes incluidos



Ilustración 15. Vista del conector CC y la entrada Jack 3.5

Se pueden apreciar las entradas y salidas de Jack 3.5 mm, el conector CC entrada de carga-descarga y el interruptor situado en la parte superior.

5. Caracterización electroacústica y toma de medidas en anecoica

En esta fase del proyecto será donde las prestaciones reales del dispositivo serán medidas y comparadas. Esto se va a realizar en tres pasos. En primer lugar, haciendo uso del programa *LIMP* (Mateljan, 2007), se realiza la caracterización del transductor analizando la impedancia eléctrica del mismo en función de la frecuencia.

En segundo lugar, se pasa a la cámara anecoica donde se realizarán medidas tanto en unas planchas de tamaño reducido y diferente material como en la guitarra. Las planchas elegidas son de un tamaño de 15 x 15 cm: una pieza de *LoudPanel* de 5 mm de grosor, una pieza de madera de densidad media o DM de 3 mm y una pieza de madera de densidad media o DM de 5 mm. Con cada una de estas piezas se realizarán tres medidas: una con el transductor en el borde de la pieza, otra en mitad del recorrido borde-centro y la última con el transductor situado en el centro. Estas medidas tienen como fin observar una diferencia en la respuesta en frecuencia del material al variar la posición del transductor, valorando así las posibles influencias de los modos propios del material.

El *LoudPanel* es un material tipo panal de abeja poco común usado en altavoces de modos distribuidos DLM. Los modos de vibración que se producen en este tipo de placas dependen de, una vez fijado su tamaño y composición, de la frecuencia. En un altavoz plano con este material se excitan un gran número de modos de vibración espaciados en el espectro de modo uniforme (Basilio Pueo, 2019).

Después de haber realizado las medidas, se procederá a medir la respuesta de la guitarra. En este caso también se harán tres mediciones: una con el transductor cercano al borde de la guitarra en el eje central; otra en el eje central pero más cercana al puente (donde se anclan y fijan las cuerdas a la tapa armónica o parte frontal de la caja de resonancia); y otra cercana al borde pero desplazada hacia uno de los lados. Estos puntos pueden observarse en el siguiente dibujo:

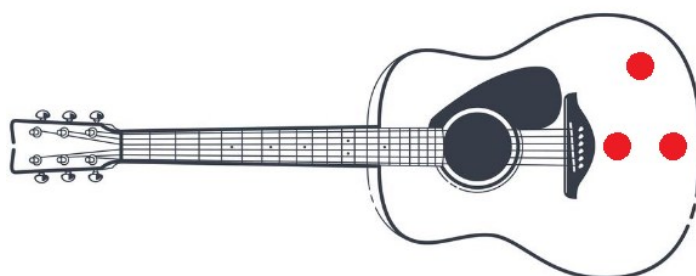


Ilustración 16. Puntos elegidos para colocar el transductor

5.1. Caracterización electroacústica con LIMP

Para la caracterización electroacústica se usa el programa *LIMP* (Mateljan, 2007). Según el manual para usuario este es «un programa diseñado para la medición de la impedancia de altavoces y la estimación de los parámetros físicos y dinámicos de los altavoces (también llamado parámetros de Thiele-Small)». Dado que el fundamento de nuestro transductor es similar, se utiliza este sistema como una aplicación válida.

El manual del programa *LIMP* citado indica que la medición de la impedancia está basada en el sistema eléctrico que se muestra a continuación (Mateljan, 2007, pág. 4):

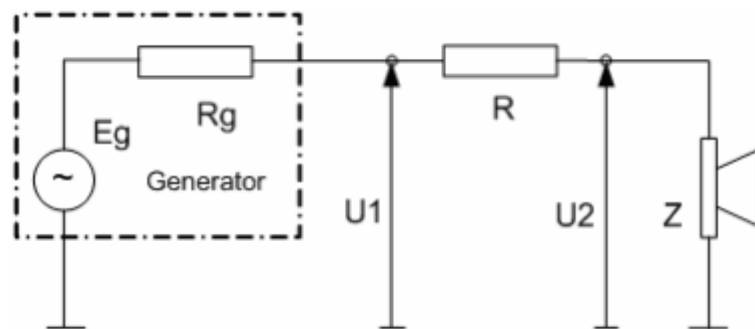


Ilustración 17. Sistema eléctrico para medir la impedancia

Donde R (resistencia de referencia) se conecta entre el generador de señal y una impedancia de altavoz Z . De esta forma, la impedancia está definida en el dominio de la frecuencia $-Z(f)$. Si se miden los voltajes $U_1(f)$ y $U_2(f)$, en ambos extremos de la resistencia de referencia, se puede estimar la impedancia del altavoz como:

$$Z(f) = \frac{U_2(f)}{U_2(f) - U_1(f)}$$

En *LIMP* se puede realizar esta medición con dos métodos: con el modo de senoide escalonada y con el modo FFT con excitación de ruido periódico rosa. Para este caso, el método usado ha sido el modo de senoide escalonada.

En esta modalidad el programa genera ráfagas de señales sinusoidales puras, haciendo un barrido en frecuencia en incrementos de 1/24 o 1/48 octavas, y mide la respuesta a la señal realizando un filtrado de ruido y los componentes de distorsión de la respuesta sinusoidal.

5.1.1. Procedimiento de medición

1. *LIMP* genera una ráfaga de señal sinusoidal con una frecuencia f .
2. Después del periodo de tiempo necesario para alcanzar el estado estacionario, se miden los voltajes a ambos extremos de la resistencia de referencia R , con la forma de series de tiempo discretas $U_1(f)$ y $U_2(f)$ de longitud N .

3. La magnitud y la fase de la señal $U_1(f)$ y $U_2(f)$ a la frecuencia f se calculan hallando los componentes sinusoidales fundamentales $U_1(f)$ y $U_2(f)$ a la frecuencia del generador f . Esto se hace resolviendo directamente la integral de Fourier en el tiempo de integración T . Estos armónicos fundamentales se usan en la ecuación anterior para calcular la impedancia Z .
4. Después de un tiempo llamado pausa entre ráfagas, necesario para que el sistema medido libere la energía reactiva, la frecuencia se incrementa en 1/24 octava (o 1/48 octava) y se repite el proceso desde el paso 1 hasta que se alcanza la frecuencia de parada predefinida, 20 KHz para este caso.

5.1.2. Procedimiento práctico de medición

Una vez mostrada la teoría y el funcionamiento del programa de medición *LIMP*, se procede a exponer cómo ha sido el proceso práctico de esta.

Para realizar dicha medición es necesario un ordenador donde tener instalado el programa citado, una tarjeta de sonido que hará las veces de traductor entre el ordenador y el hardware necesario para medir una placa impresa con conexiones para entrada-salida para el transductor y la tarjeta de sonido; esta placa es la que contiene el circuito mostrado en la *Ilustración 17* y el transductor a caracterizar en cuestión.

Una vez conectada la tarjeta de sonido al ordenador, hay que realizar un calibrado previo que asegure que el transductor no vaya a saturar dando lugar a una medida poco fiable. Además, hay que tener en cuenta que la diferencia de sensibilidad de los dos canales no sea mayor a 0.2 dB; para ello, *LIMP* dispone de un panel de calibrado donde se muestran los niveles de las entradas y su diferencia de sensibilidad. Ajustando los potenciómetros de la tarjeta de sonido se equilibran las barras de nivel para no superar el nivel de 0.2 dB. Una vez calibrada, se procede a conectar el transductor.

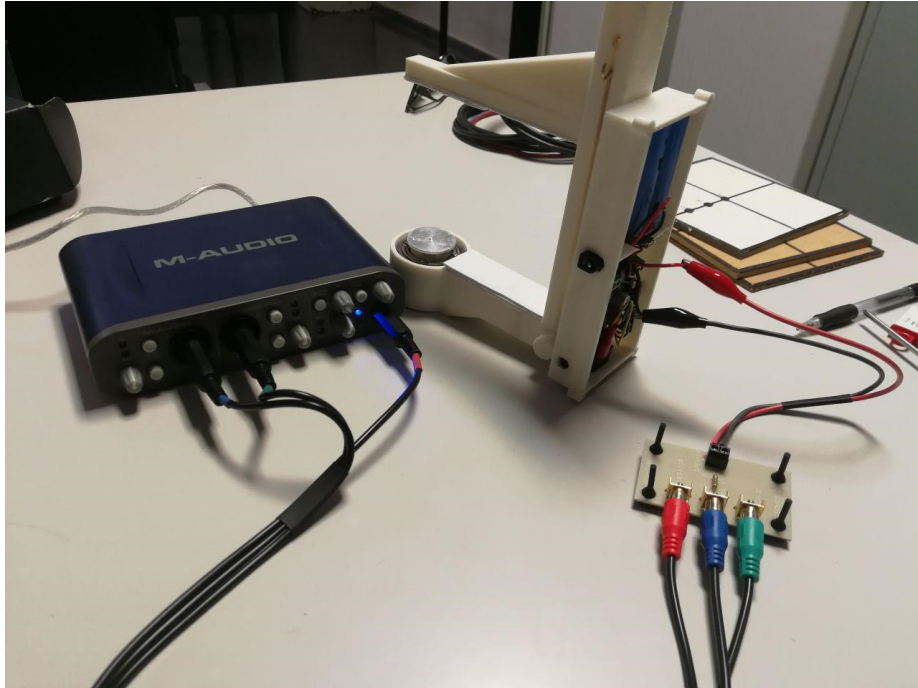


Ilustración 18. Montaje listo para realizar la medición en LIMP

En la *Ilustración 18* se puede apreciar el montaje anteriormente descrito, compuesto de (de izquierda a derecha) tarjeta de sonido, dispositivo creado que alberga el transductor y el circuito impreso con las conexiones y la resistencia de referencia.

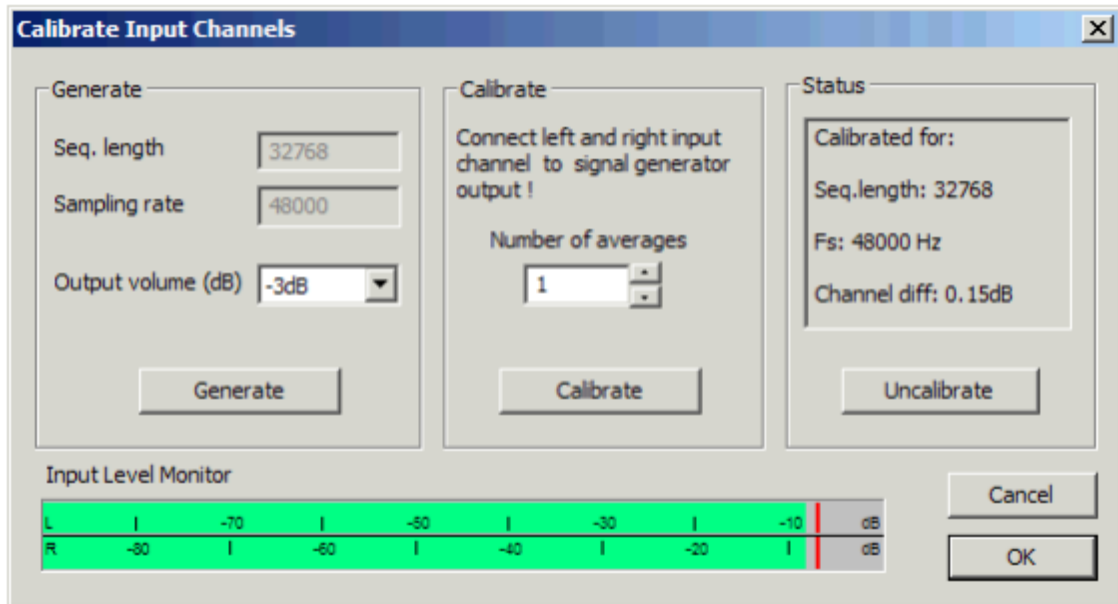


Ilustración 19. Panel de calibrado de la tarjeta de sonido

La *Ilustración 19* muestra el panel de configuración donde calibraremos los niveles de la tarjeta de sonido.

5.1.3. Obtención de parámetros Thiele-Small

Los parámetros Thiele-Small (*Thiele, 1971 y Small, 1972*) describen el funcionamiento de un transductor a bajo nivel. A través de los mismos es posible predecir el funcionamiento de determinado transductor, principalmente su respuesta en frecuencia, pero también la impedancia eléctrica, la excursión del cono, SPL máximo, velocidad de port y derivados. Estos parámetros, de forma resumida, son (*Sacerdoti, 2017*):

Fs (Hz): frecuencia de resonancia.

Re (Ω): Resistencia eléctrica de la bobina.

Qms: Factor de calidad mecánico, indicador de pérdidas mecánicas.

Qes: Factor de calidad eléctrico, indicador de pérdidas eléctricas.

Qts: Factor de calidad del altavoz, indicador de pérdidas eléctricas y mecánicas.

Vas (m^3): Volumen de aire equivalente a la compliancia mecánica del altavoz (Cms)

Cms (m/N): Compliancia mecánica del altavoz.

Rms (Kg/N): Resistencia mecánica del altavoz.

η_0 (%): Eficiencia del altavoz. Relación entre la potencia eléctrica entregada y la potencia acústica radiada.

Sd (cm^2): Área efectiva del diafragma pistón.

Impedancia (Ω): Oposición al paso de la corriente que varía con la frecuencia. Aunque nominalmente se fija un valor determinado (normalmente 4, 8 o 16 Ω), su variación con la frecuencia presenta singularidades. Suele existir un pico de mayor impedancia coincidiendo con la frecuencia de resonancia del transductor y, por otro lado, se produce un incremento de esta hacia las altas frecuencias debido a la inductancia de la bobina.

Bl (Tm): Es una medida de la fuerza del motor electromagnético.

Xmax (mm): Excursión máxima del altavoz. La distancia entre la posición de reposo y el límite hacia dentro o fuera del cono.

Vd (m^3): Volumen de aire desplazado.

Le (μH): Inductancia eléctrica de la bobina. Afecta al transductor en altas frecuencias, normalmente, a mayor inductancia menor nivel.

Sensibilidad (dB): Nivel de presión sonora producido sobre el eje a 1 metro de distancia al aplicar 1 W de potencia (dB SPL 1 w/1m).

Bl (Tm): Es una medida de la fuerza del motor electromagnético.

(*Avellaneda, Gurrero, Maldonado & Rodríguez, 2015*).

Para la obtención de estos parámetros se realiza el método de la carga añadida, que consiste en realizar una medición inicial del transductor y posteriormente repetirla, pero

añadiendo al pistón del transductor una carga controlada y medida. En este caso, debido a la fragilidad de la superficie con la que va a estar en contacto el transductor (madera de la guitarra), se decidió añadir una capa de material termofusible al área del pistón para asegurar un correcto contacto y protección.

Este añadido implica que el transductor va a estar siempre funcionando con esta carga añadida al pistón, es por esto por lo que se realizaron tres medidas diferentes:

- Una con el transductor de fábrica, es decir, sin el añadido del material termofusible. Esta medición servirá para comparar la diferencia con la capa añadida permanente.
- Una segunda medida con la capa de material termofusible con la que el transductor operará normalmente.
- Una tercera medición con una masa controlada añadida a la capa de material termofusible que nos permitirá obtener a través del método anteriormente explicado los parámetros Thiele-Small.



Ilustración 20. Transductor con las diferentes cargas a medir

En la ilustración anterior pueden observarse de izquierda a derecha el transductor sin carga, con la carga del material termofusible y con las dos cargas. Estas serán las configuraciones usadas para realizar la medición.

Con este escenario planteado, se procede a realizar las mediciones explicadas.

5.1.4. Resultados en transductor sin carga añadida (en aire libre)



Ilustración 21. Transductor sin carga

Con toda la configuración anteriormente descrita, se marca un intervalo frecuencial de 20 Hz a 20 KHz y se realiza el barrido frecuencial. Una vez terminado este barrido, se obtiene la siguiente tabla:

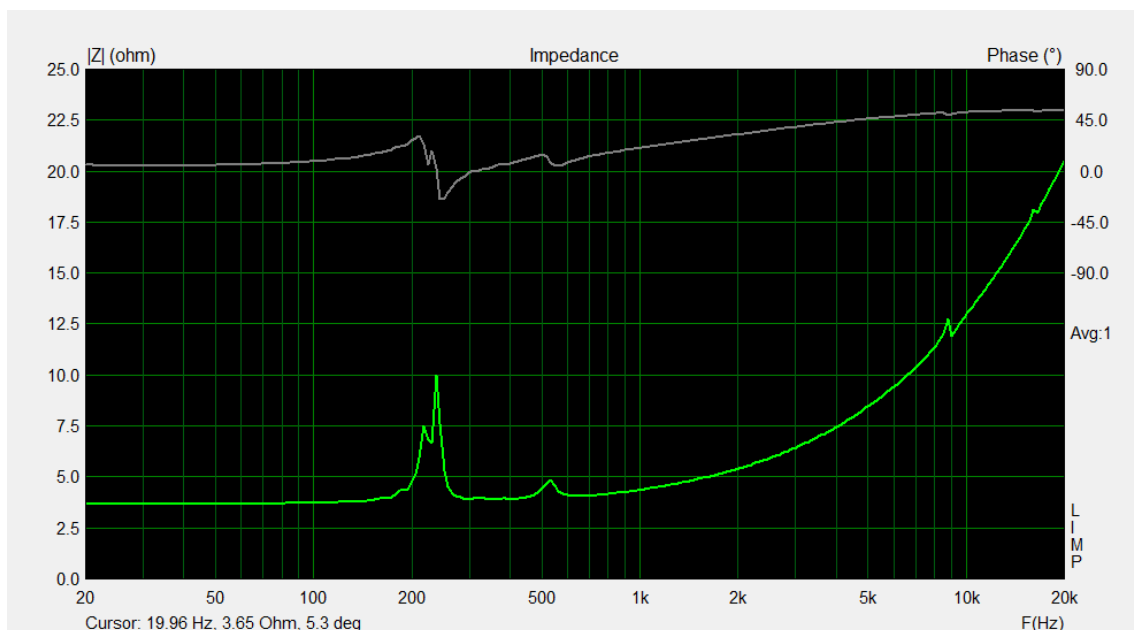


Ilustración 22. Curva de impedancia del transductor sin carga

En la línea inferior puede observarse un pico de impedancia en la frecuencia de resonancia. Puesto que esta configuración del transductor (sin ninguna masa añadida) no va a ser nunca utilizada en el uso real del dispositivo, solo nos servirá como una curva de comparación con el transductor en su estado original.

5.1.5. Resultados en transductor con carga añadida (masa termofusible)



Ilustración 23. Transductor con carga de material termofusible

Como se ha explicado anteriormente, debido a la necesidad de interponer un material que asegure un buen contacto con la superficie, que sea antideslizante y que a su vez proteja la madera de la guitarra de las vibraciones del metal, esta será la configuración por defecto y con la que se van a realizar todas las medidas. Es decir, será como si el transductor viniera así de fábrica.

Por esto último, se realiza otra vez el mismo proceso que se ha hecho en el caso sin ninguna masa añadida y se tomará el resultado como si no se le hubiera añadido nada.

Tras realizar el barrido frecuencial en el intervalo descrito en el caso anterior, se obtiene la siguiente curva:

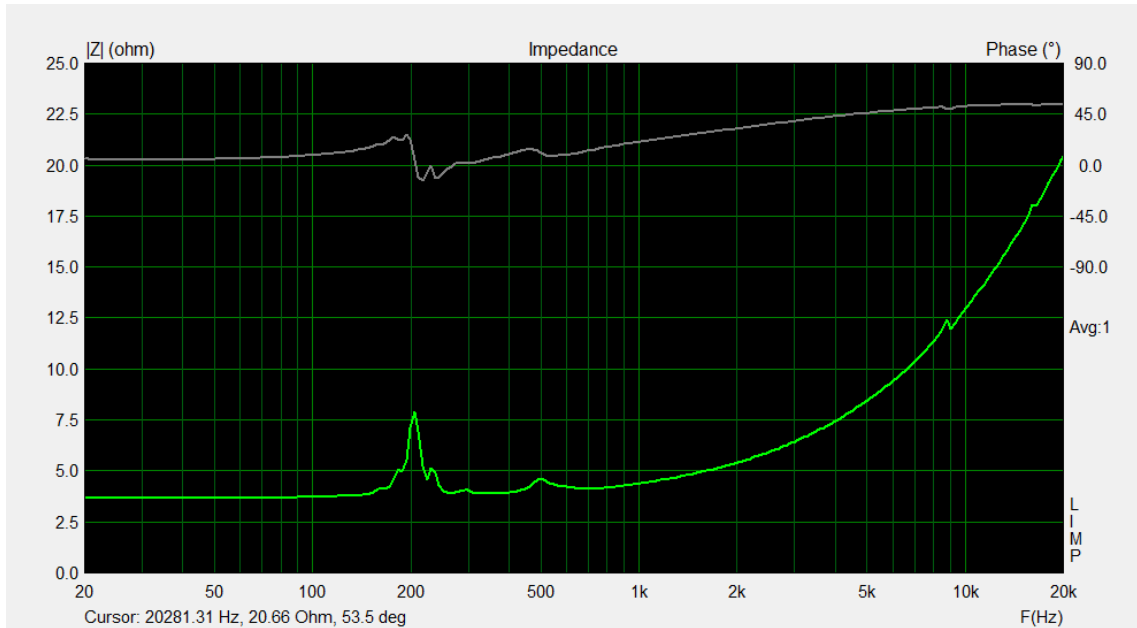


Ilustración 24. Curva de impedancia con la carga del material termofusible

Solamente a modo de observación superponemos las dos medidas anteriores para ver la diferencia que supone añadir esta capa de material termofusible y de 2.18 gramos de masa.

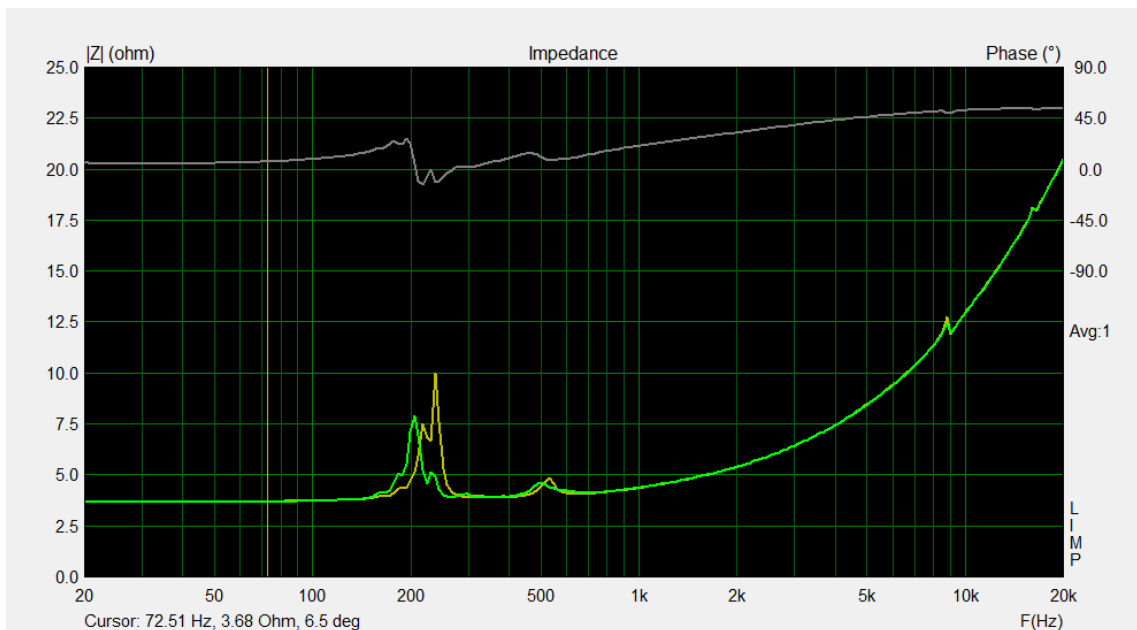


Ilustración 25. Curva de impedancia sin carga y con carga del material termofusible

En amarillo puede observarse la curva con el transductor por defecto y en verde la curva con la masa descrita. Puede apreciarse una reducción en el pico de impedancia al igual que un desplazamiento en la frecuencia de este pico.

5.1.6. Resultados en transductor con carga añadida (moneda y termofusible)



Ilustración 26. Transductor con carga de material termofusible y una segunda carga

Para esta medida nos valdremos de una masa de peso conocido que se situara encima del pistón del transductor. Tras ejecutar el barrido frecuencial en el espectro anteriormente descrito se obtiene la siguiente curva:

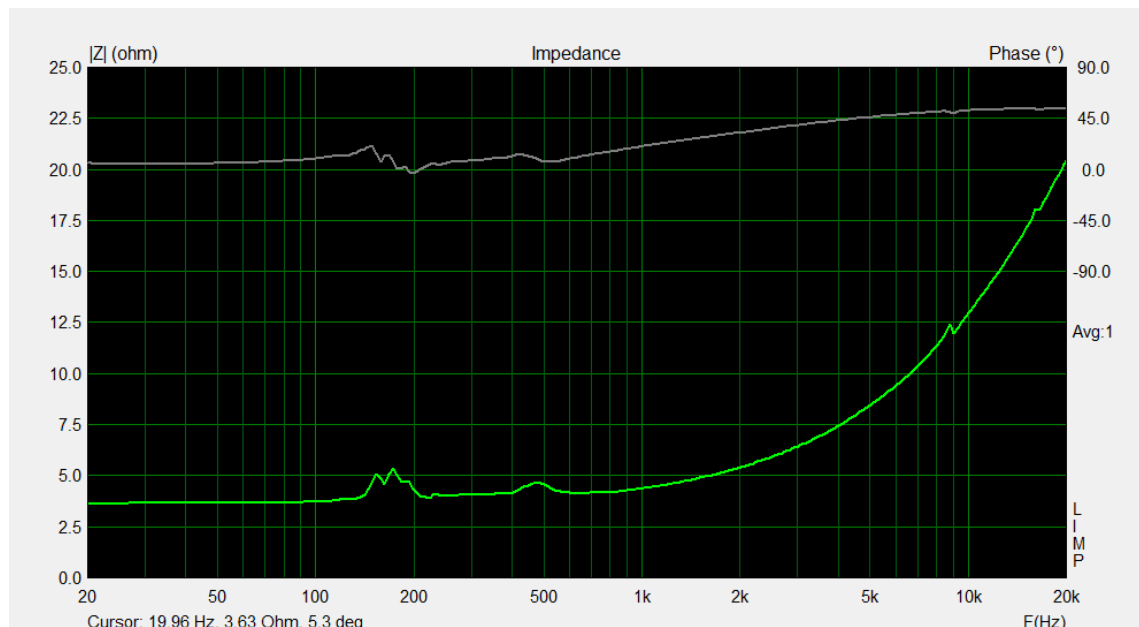


Ilustración 27. Curva de impedancia del transductor con dos cargas

Puede observarse una gran modificación del pico de impedancia en comparación con el primer caso medido. Esto es debido al total de las masas añadidas (capa termofusible y moneda) que hacen un total de 6.29 gramos.



Ilustración 28. Pesaje de las dos cargas utilizadas

5.1.7. Parámetros de Thiele-Small con el método de la carga añadida

Como ya se ha señalado, solo se contabilizará como carga añadida la moneda puesto que la capa termofusible va a estar continuamente funcionando con el transductor.

Así pues, la masa añadida contabilizada es de 4.11 gramos como puede observarse en la *Ilustración 28*.

Al juntar las dos curvas (termofusible más la moneda y termofusible) en una gráfica, puede observarse la diferencia entre ellas.

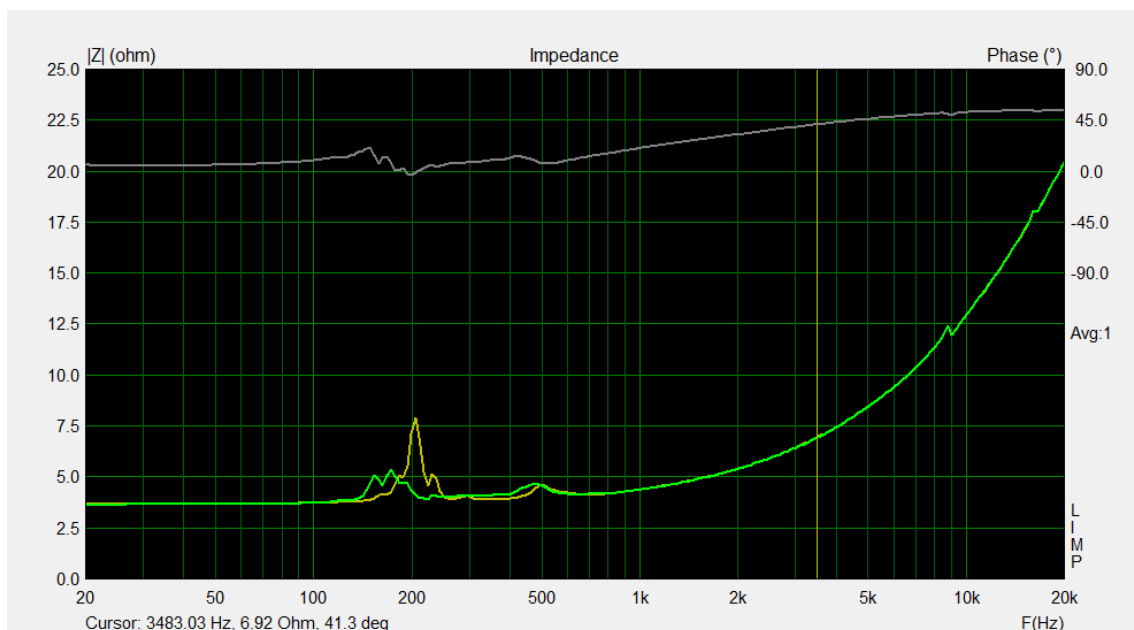


Ilustración 29. Curvas de impedancia con material termofusible y con las dos cargas

En amarillo, la curva con material termofusible, y en verde, la curva con la masa añadida de 4.11 gramos. Se observa una gran caída en la impedancia y un desplazamiento en la frecuencia de este pico.

Con estas dos curvas ya se pueden obtener los parámetros Thiele-Small a través del programa *LIMP*. Para ello, en el panel dedicado a este fin hay que introducir el valor de resistencia de la bobina, el diámetro de la membrana del transductor y el valor de la masa añadida.

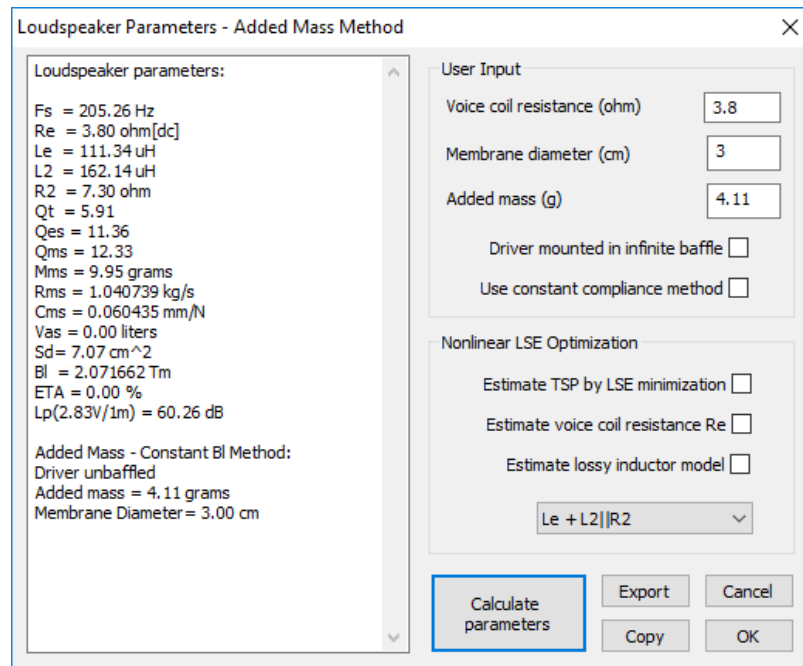


Ilustración 30. Parámetros Thiele-Small con el método de la masa añadida

Se introducen los valores requeridos:

- Valor de resistencia de la bobina: 3.8 Ω (valor mínimo de la curva)
- Diámetro de la membrana del transductor: 1.5 cm
- Valor de la masa añadida: 4.11 gramos

Y se obtienen los siguientes valores Thiele-Small

Fs = 205.26 Hz	Qes = 11.36
Re = 3.80 ohm[dc]	Qms = 12.33
Le = 111.34 μ H	Mms = 9.95 grams
L2 = 162.14 μ H	Rms = 1.040739 kg/s
R2 = 7.30 ohm	Cms = 0.060435 mm/N
Qt = 5.91	Vas = 0.00 liters

$$S_d = 7.07 \text{ cm}^2$$

$$B_l = 2.071662 \text{ Tm}$$

$$\text{ETA} = 0.00 \%$$

$$L_p(2.83\text{V}/1\text{m}) = 60.26 \text{ dB}$$

Added Mass - Constant B_l
Method:

Driver unbaffled

Added mass = 4.11 grams

Membrane Diameter = 3.00 cm

Una vez recogidos estos datos, ya se pueden realizar las medidas en la cámara anecoica.

5.2. Toma de medidas en cámara anecoica

Como ya se ha explicado en el inicio de esta fase, en esta parte se van a realizar diferentes medidas en diferentes materiales. Para ello dispondremos de la cámara anecoica de la Escuela Politécnica Superior de Gandía, un trípode con el transductor y el dispositivo que radiará el sonido, otro trípode con un sonómetro y un generador de ruido rosa externo a la sala. El montaje queda como puede apreciarse en la siguiente imagen:

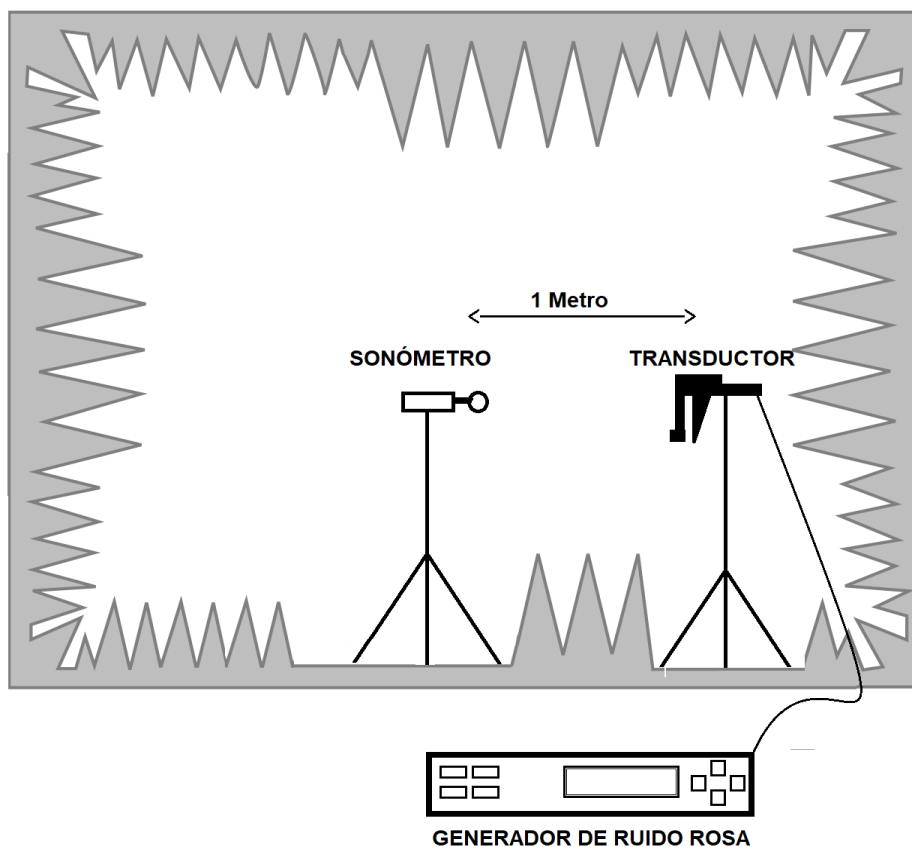


Ilustración 31. Croquis del montaje realizado para medir en la cámara anecoica



Ilustración 32. Imagen real del montaje realizado

Con esta disposición sólo habrá que cambiar en la parte del transductor los materiales y los puntos de medida en cada uno de ellos.

Como el generador de ruido rosa puede estar continuamente funcionando, las medidas se realizan de una forma continuada cambiando únicamente el material radiante y las diferentes posiciones de medida.

Una vez dispuestos todos los dispositivos en su sitio y dispuestos a medir, se ajusta el nivel del generador a -13 dB para que no sature el transductor y genere malos resultados. Una vez hecho esto, el transductor ya está generando el ruido rosa y se procede a medir.



Ilustración 33. Generador de ruido rosa en el centro externo a la cámara anecoica

El sonómetro está configurado para que mida durante 10 segundos y cada tercio de octava. Por otra parte, después de cada una de las medidas, se cambiarán las posiciones de cada material y el propio material. Así pues, primero se estudiará el comportamiento del *LoudPanel* (puntos 1, 2 y 3), después el panel de madera DM de 5 mm de grosor (puntos 1, 2 y 3), luego el panel de madera DM de 3 mm de grosor (puntos 1, 2 y 3) y finalmente se realizará el estudio de la guitarra en tres puntos diferentes. Esto tiene el objetivo de observar las variaciones que se producen en función de la posición de radiado.

Las planchas tienen un tamaño de 15 X 15 cm, 7,5 cm desde el borde hasta el centro. Los puntos 1, 2 y 3 están situados a 2,5, 5 y 7,5 cm del borde. De esta forma la superficie del transductor queda completamente dentro de la pieza en el caso del punto más cercano al borde.

5.2.1. Ruido rosa en LoudPanel de 5 mm de grosor y 15 x 15 cm

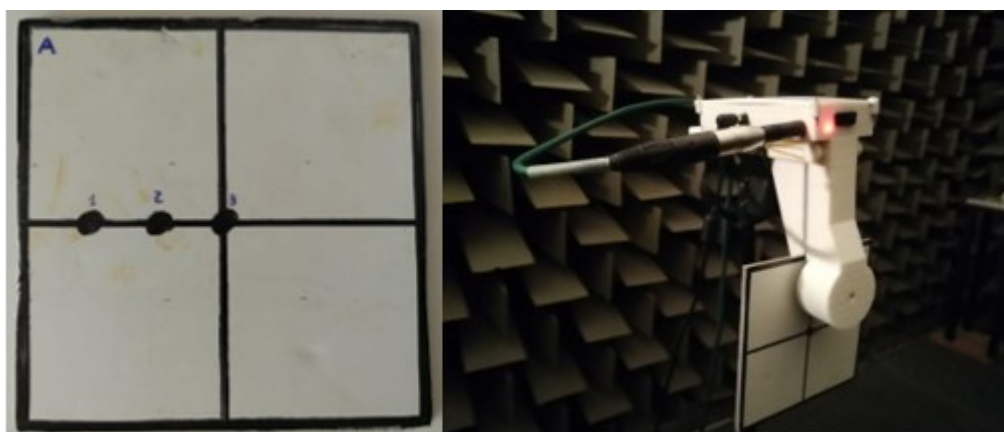
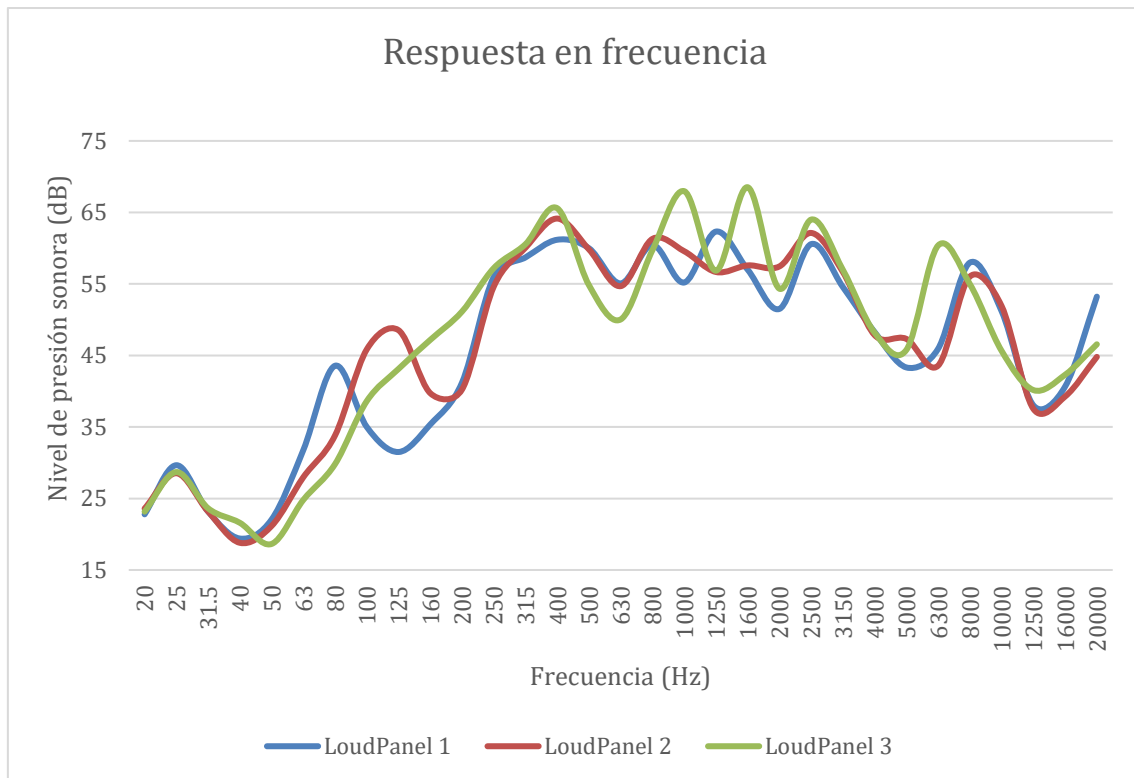


Ilustración 34. LoudPanel y su disposición en la cámara para la medición

El material del que está hecho el *LoudPanel* (véase más arriba) posee la propiedad de tener una respuesta similar en todas las frecuencias, por lo que debería ofrecer una respuesta relativamente uniforme como se explica anteriormente en el punto 5.



Gráfica 1. Curvas obtenidas en LoudPanel 5 mm

Puede apreciarse que la respuesta en subgraves y graves (20 a 250 Hz) no es muy buena en ninguno de los tres puntos puesto que se producen grandes oscilaciones. Es en la parte alta de los graves (cerca de los 250 Hz) donde los tres puntos confluyen y se estabilizan. Sería el punto 3 o central donde se produce una mejor respuesta de graves dando lugar a una curva con menos oscilaciones y un aumento del nivel más progresivo y sin tantas oscilaciones como en el resto.

En la parte de medios (250 a 2000 Hz) los tres puntos están más estabilizados mostrando variaciones, pero menos acusadas que en el rango anterior. En este rango el punto de radiación que destaca es el 2 mostrando una curva más estable y con unas variaciones menores.

En la zona de los agudos y agudos altos (2000 a 20 000 Hz) los tres puntos tienen casi la misma respuesta mostrando casi las mismas oscilaciones. El nivel no decae hasta el punto de las frecuencias bajas por lo que no se pierde mucho nivel sonoro.

Estos resultados concuerdan con la percepción personal a la hora de hacer el experimento. Se notaba que había una falta de frecuencias graves y que claramente predominaban las frecuencias medias en los tres puntos de medida.

5.2.2. Ruido rosa en madera DM de 5 mm de grosor y 15 x 15 cm

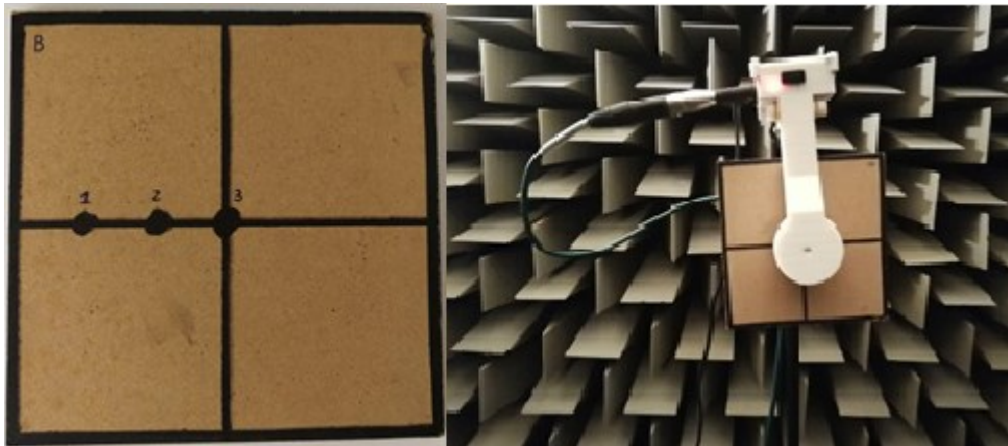
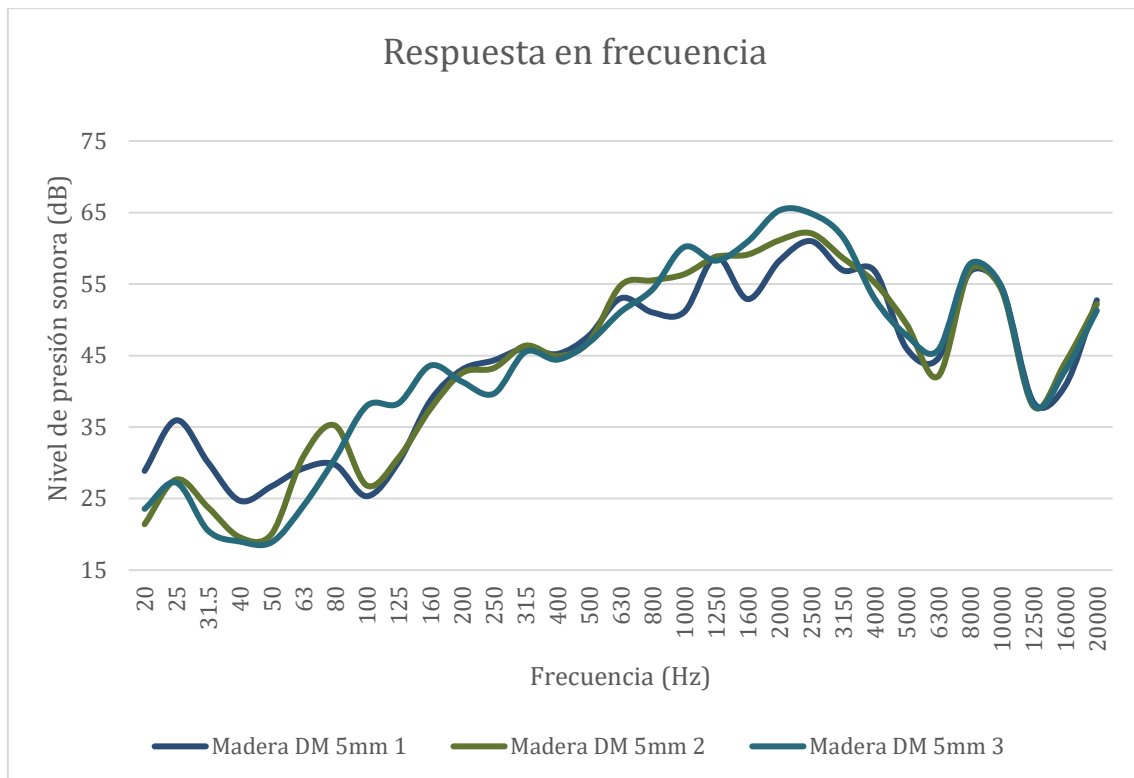


Ilustración 35. Madera DM 5 mm y su disposición en la cámara para la medición

Las medidas en este medio pretenden acercarse a la respuesta que se va a obtener en la guitarra, puesto que ambos materiales son madera. Al no poder conseguir una chapa de madera con las características de una guitarra, tanto en grosor como en calidad de la madera, el experimento se realiza con madera de densidad media de 5 mm. Aun no siendo el material una plancha tan fina y de la calidad de la de una guitarra, la respuesta en frecuencia será la típica de una madera, con unos graves más presentes y con una curva creciente hasta la parte final de los agudos (4000 Hz).



Gráfica 2. Curvas obtenidas en madera DM de 5 mm

Como se esperaba, los graves están más presentes que en el *LoudPanel*, especialmente en la posición 1 que muestra un nivel mayor. Es en torno a los 250 Hz donde las tres curvas se estabilizan y muestran un nivel creciente y con unas oscilaciones menores hasta los 4000 Hz donde se produce una caída y oscilación mayor.

Es el punto 3 o central el que muestra, a mi juicio, una mejor respuesta, puesto que desde los 100 Hz a los 200 Hz muestra un nivel superior a los demás puntos. Esto le da un refuerzo notable en el rango de los graves que marca la diferencia.

La percepción obtenida en el experimento concuerda perfectamente con los resultados obtenidos. En el punto central es donde la parte grave tiene más presencia.

5.2.3. Ruido rosa en madera DM de 3 mm de grosor y 15 x 15 cm

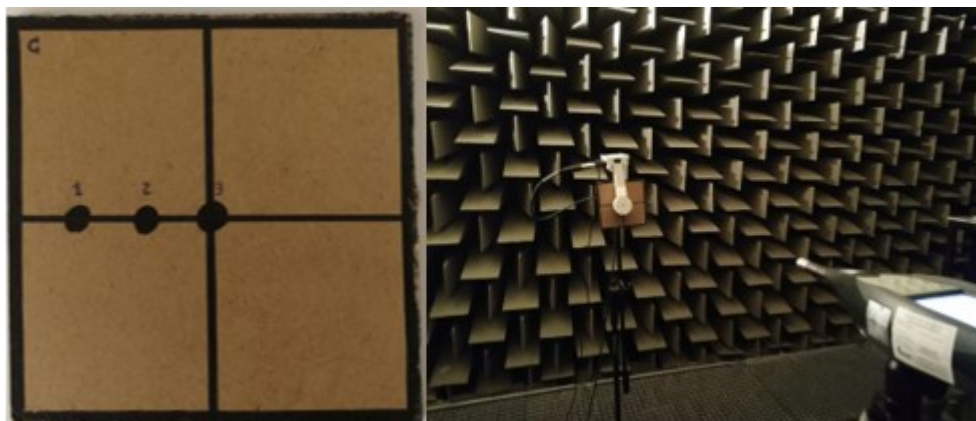
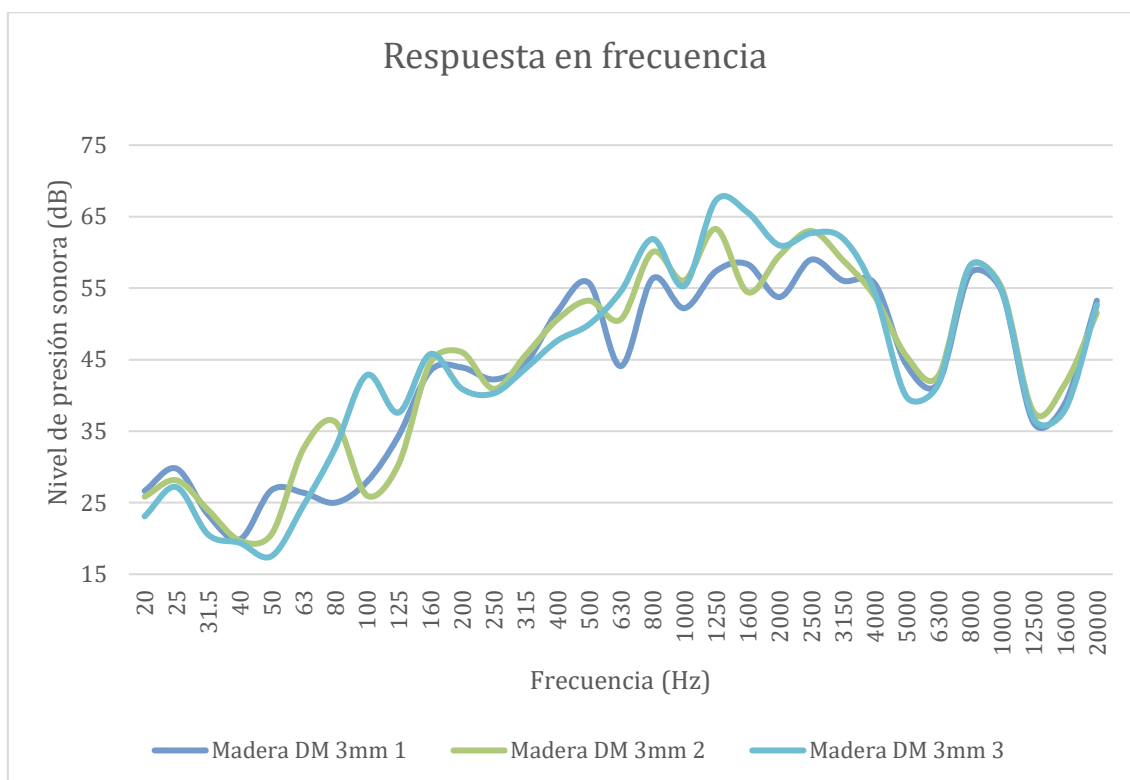


Ilustración 36. Madera DM de 3 mm y su disposición en la cámara para la medición

En este caso, al tratarse del mismo material que el anterior, pero esta vez con 3 mm de grosor, se espera que la respuesta en frecuencia sea muy parecida al caso anterior, pero mostrando algunas oscilaciones.



Gráfica 3. Curvas obtenidas en madera DM de 3 mm

Como se esperaba, la respuesta en frecuencia es muy similar a la del caso anterior. Puede observarse un descenso en el nivel de subgraves de la posición 1. Por lo demás, el resto

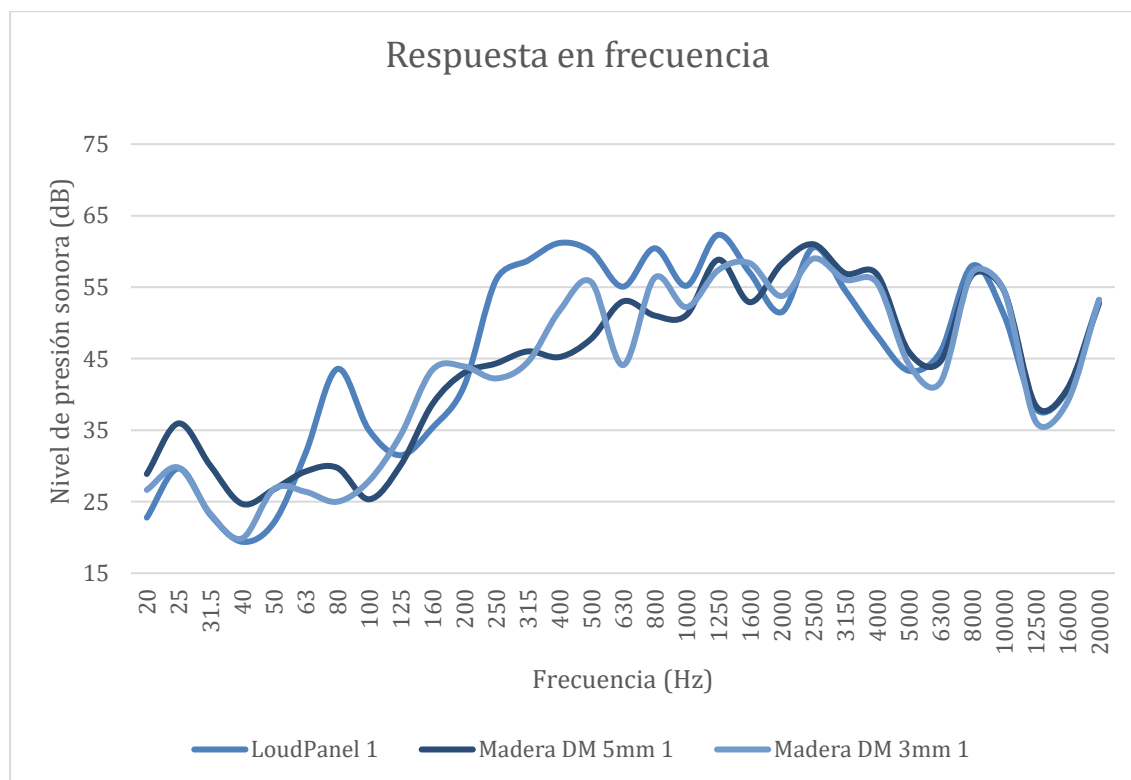
es muy similar al resultado anterior, pero con las oscilaciones esperadas debido al grosor del material.

Por otra parte, en la sensación percibida en el experimento, la presencia de graves era mayor en este caso con el material más fino. Puede ser debido a los picos que hay para los puntos 2 y 3 en las frecuencias entre 80 y 200 Hz que tienen un nivel algo superior al caso anterior.

5.2.4. Comparativa entre los 3 materiales

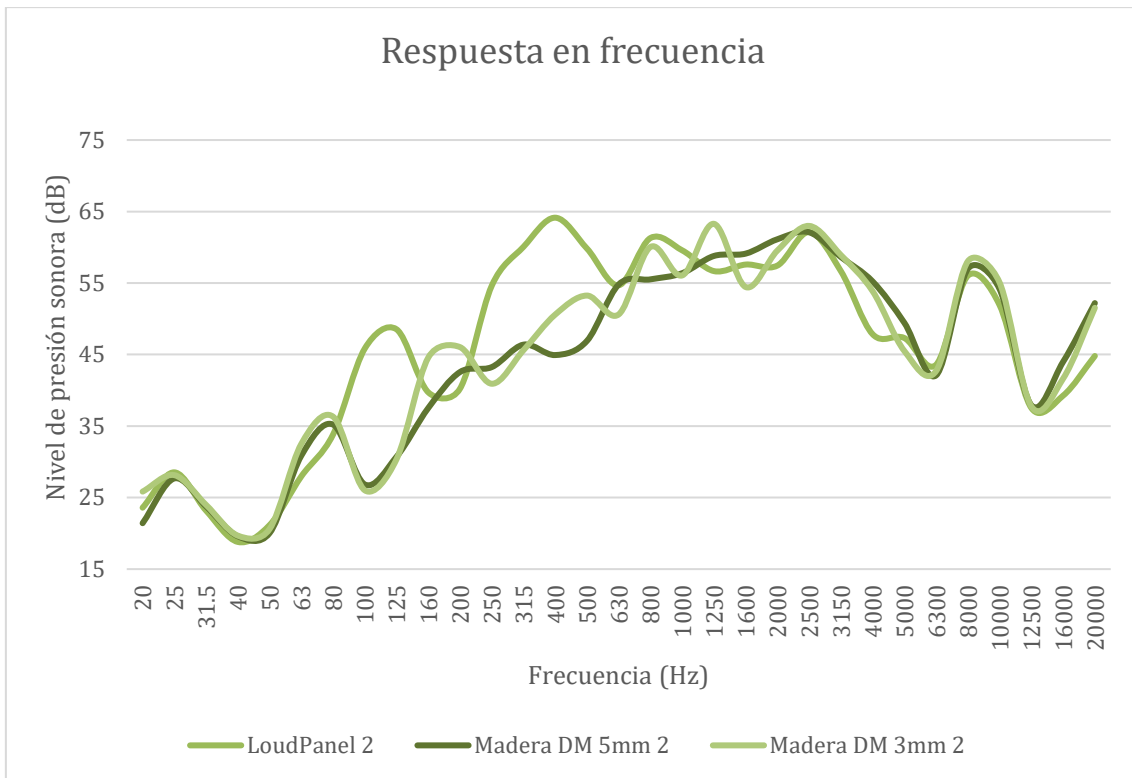
Para ver la diferencia entre cada material y cada punto se muestran a continuación las gráficas con cada uno de los puntos y cada uno de los materiales.

- Como puede verse en la siguiente gráfica, para el primer punto, el más alejado del centro, se aprecia que el *LoudPanel* se encuentra por encima del nivel que tiene la madera. Mostrando un pico prominente entorno a los 80 Hz y alcanzando un nivel estable más plano y con un nivel superior. Mientras que la madera va aumentando su nivel a lo largo del rango de graves-medios, el *LoudPanel* alcanza el nivel alto en torno a los 200 Hz y mantiene el nivel hasta los agudos donde los 3 materiales tienen casi la misma respuesta.



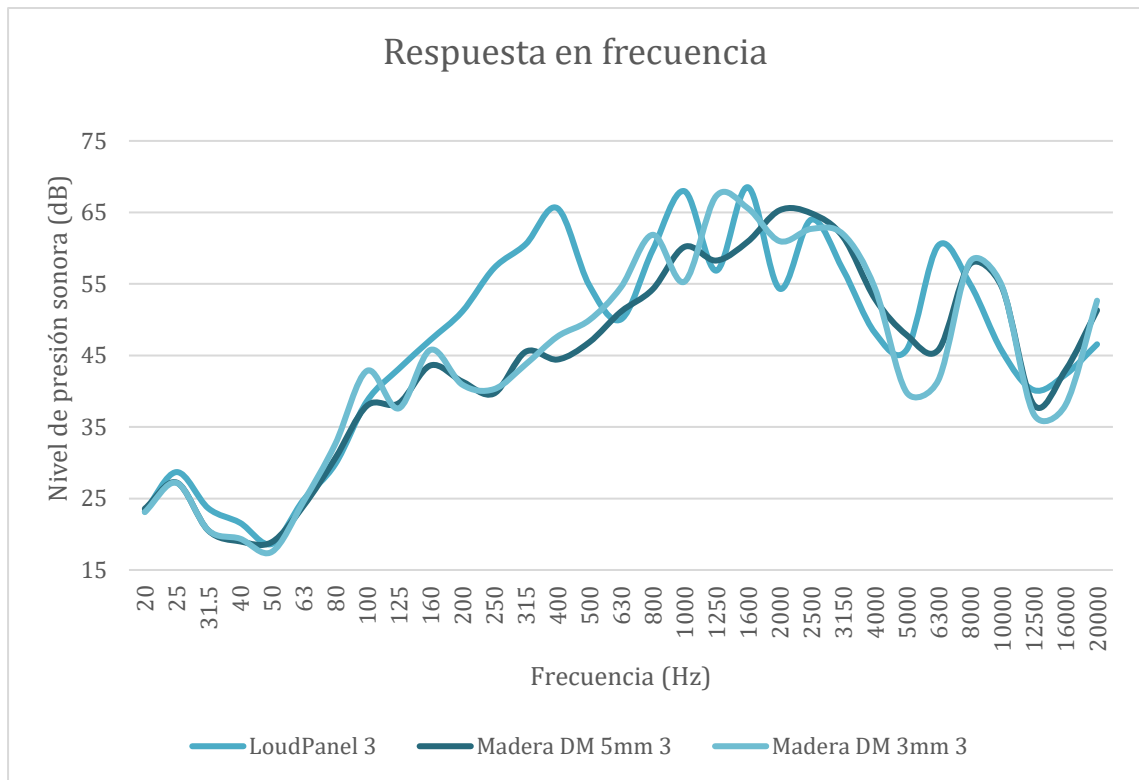
Gráfica 4. Curvas del punto 1 de las 3 planchas

- En la *Gráfica 5* se observa que la respuesta en frecuencia está más igualada a partir de 630 Hz y también en el rango de subgraves (20 a 80 Hz) entre los 3 materiales. No así en el rango de 80 a 500 Hz donde destaca el *LoudPanel* por su pico en los 100-125 Hz y su alto nivel al comenzar los 250 Hz (zona de medios).



Gráfica 5. Curvas del punto 2 de las 3 planchas

- En esta última gráfica comparativa la posición del centro iguala más las respuestas, mostrando unas curvas casi idénticas en la zona de subgraves (20 a 80 Hz) y muy parecidas desde los 630 Hz. No obstante, el *LoudPanel* sigue estando por encima en el rango graves-medios respecto a la madera.



Gráfica 6. Curvas del punto 3 de las 3 planchas

5.3. Ruido rosa en 3 puntos de la guitarra

La forma de proceder en esta parte del experimento va ser muy parecida a la anterior. En este caso las posiciones donde se colocará el transductor serán diferentes y vienen dadas por condiciones tales como que no moleste el transductor a la hora de tocar la guitarra, que saque un buen sonido a un nivel alto y que haya una diferencia notable entre cada uno de los puntos.

Estos puntos han sido elegidos en la fase inicial de pruebas preliminares, donde, con el prototipo montado, se colocó el transductor en diferentes puntos de la guitarra para comprobar la calidad de la sonoridad. Así pues, se seleccionaron los puntos mostrados a continuación donde el punto 1 mostraba un buen equilibrio y respuesta en frecuencia de casi todo el espectro, pero con la parte de subgraves poco potenciada. Los puntos 2 y 3 eran muy parecidos teniendo la posición 3 unos subgraves un poco más notorios y en general unos graves más presentes que el resto de frecuencias.



Ilustración 37. Posición y numeración de los puntos a estudiar en la guitarra

Según estas apreciaciones iniciales, se procede a realizar el estudio de la guitarra. Cabe destacar que debido a que en este caso existe una caja de resonancia, los niveles sonoros serán mayores que con las planchas anteriores.

Para equiparar las medidas al montaje anterior, en esta ocasión se ha hecho uso de una mesa que eleva la guitarra al nivel que tenía anteriormente el sonómetro. La distancia entre los dos objetos sigue siendo de 1 metro.

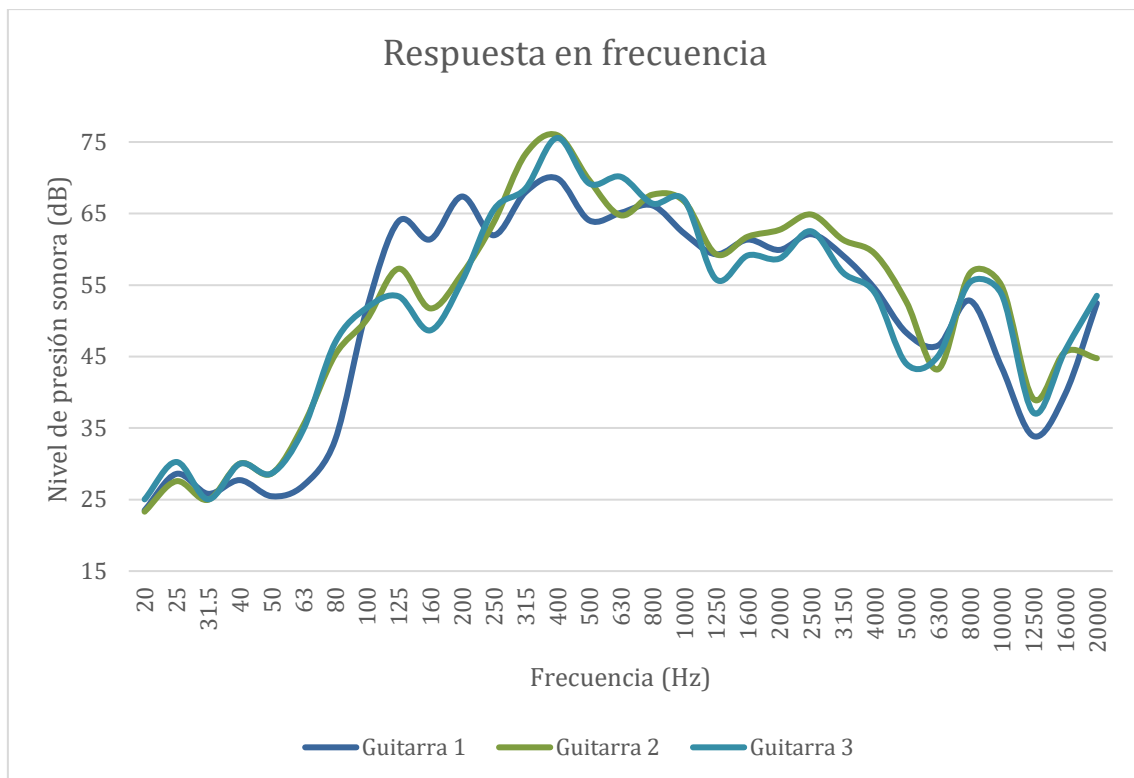
El montaje se muestra a continuación junto con la posición de diferentes puntos de la guitarra.



Ilustración 38. Montaje realizado para la medición de la guitarra



Ilustración 39. Dos de los tres puntos medidos en la guitarra



Gráfica 7. Curvas obtenidas de la guitarra

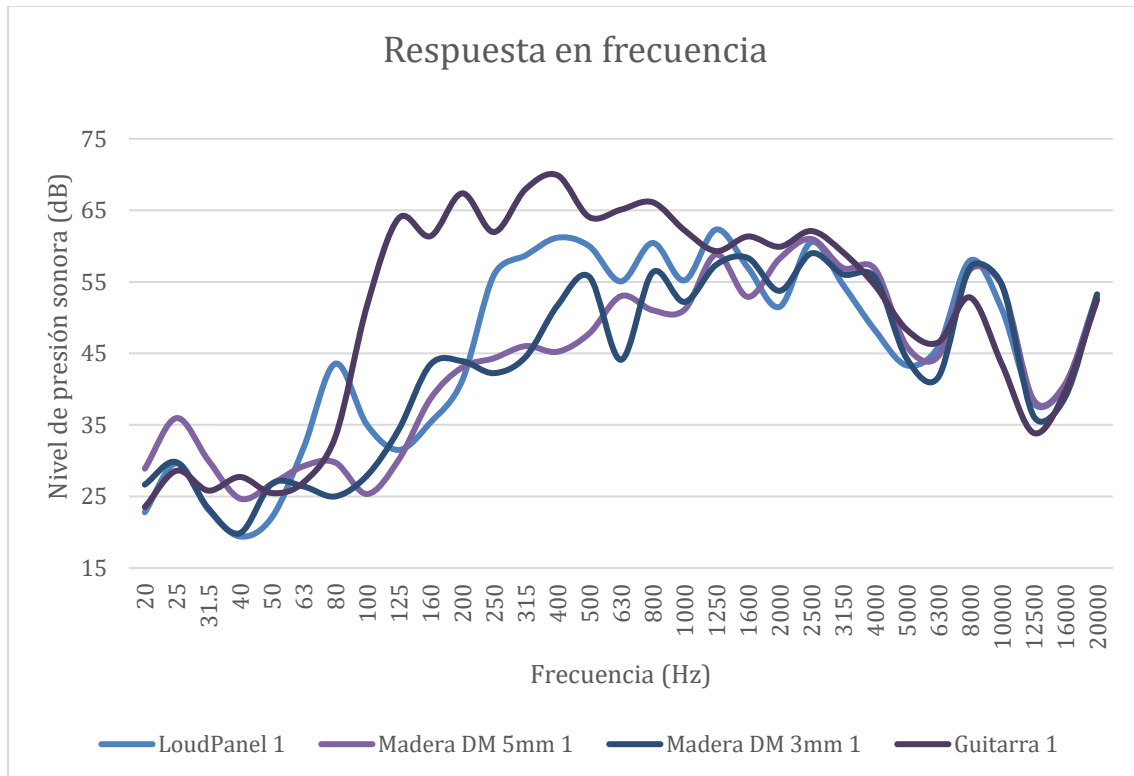
Rápidamente se observa que el punto 1 es el más equilibrado, pues muestra una respuesta más plana que el resto durante más frecuencias. Destaca la subida que existe desde los 80

a los 100 Hz donde alcanza el nivel máximo para mantenerse relativamente plana hasta los 4000 Hz, lo que es una muy buena respuesta. Respecto a los otros dos puntos de medida, puede apreciarse lo que se había experimentado ya en la etapa preliminar, esto es, una presencia de subgraves mayor que en el punto 1 pero un menor equilibrio de las frecuencias a lo largo del espectro. Esto da lugar a unos graves más prominentes que molestan al resto de frecuencias a la hora de escuchar una canción.

Con el dispositivo colocado en la posición 1, nos encontramos con un altavoz bastante aceptable y con poco que envidiar a otros altavoces de gama media que se pueden encontrar en el mercado.

6. Comparativa de datos, observación subjetiva y objetiva de los resultados

Con el fin de mostrar de una forma gráfica la diferencia entre los primeros materiales estudiados y la guitarra, se ofrece la siguiente gráfica donde se muestran las curvas medidas en el punto 1 de las planchas y la curva medida en el punto 1 de la guitarra.



Gráfica 8. Comparativa del punto 1 de las planchas y la guitarra

Puede observarse una gran diferencia tanto en nivel sonoro como en respuesta en el espectro, al situarse la guitarra en un nivel superior de calidad acústica.

Mientras que la guitarra se muestra más o menos estable en la zona de subgraves los paneles tienen muchas oscilaciones, en el rango de los 10 Hz, la guitarra aumenta su nivel rápidamente para mantenerse relativamente plana en comparación con el resto de materiales. Solo a partir de los 4000 Hz la guitarra se iguala con el resto de materiales.

Estos resultados son los esperados, puesto que en las pruebas preliminares realizadas existe una gran diferencia entre el comportamiento de las planchas y el de la guitarra, siendo el de esta muy superior.

Las cajas de resonancia en las guitarras están hechas precisamente para amplificar “naturalmente” el sonido producido por la vibración de sus cuerdas y para darle brillo y color. No es de extrañar, pues, que tengan tan buena respuesta. En el caso de este estudio, se

trata de una guitarra con caja estrecha, por lo que su comportamiento es bueno en la parte alta del espectro. Aunque no se ha tenido la opción de realizar las medidas oportunas en una guitarra con caja ancha, sí se ha podido probar el dispositivo en una de ellas. Como era de esperar, al aumentar el tamaño de la caja, su frecuencia en la parte baja del espectro frecuencial es mejor que en el de la guitarra estudiada, aportando un nivel más alto y mucha más presencia a estas frecuencias.

7. Conclusiones y futuras líneas de estudio

El propósito de este estudio era crear un sistema portátil, reducido, relativamente barato, multiusos y útil que permitiese aprovechar la tapa y la caja de resonancia de un instrumento de cuerda para reproducir sonidos con una calidad aceptable. En este trabajo se ha realizado y caracterizado un prototipo en una guitarra. A la vista de los resultados obtenidos, puede asegurarse que el sonido logrado en esta guitarra es muy bueno, lo que confirma la consecución del objetivo planteado. Con el dispositivo se puede usar la guitarra como un altavoz y, además, tocar al mismo tiempo.

La idea original pretendía usar este dispositivo para reproducir audio en general. Es decir, si el músico desea reproducir una base rítmica y tocar por encima una línea melódica o una rueda de acordes, el audio debería ser bueno, al igual que si el músico desea reproducir una canción y tocar por encima una línea melódica o improvisar. El dispositivo cumple las expectativas, aunque son mejorables en futuros trabajos. Por ejemplo, puede plantearse una modificación en base a parámetros que “invierta” la respuesta en frecuencia del dispositivo, mejorando la reproducción.

Otros usos para los que se ha probado el sistema han sido:

- Conectar un bajo por la línea de entrada del dispositivo pudiendo así tocar con una sola caja de resonancia los dos instrumentos, guitarra y bajo eléctrico. Esto puede ser de utilidad entre otras situaciones cuando dos músicos quieren salir a la calle a tocar sus instrumentos sin necesidad de cargar con pesados amplificadores y fuentes de alimentación. Puesto que este dispositivo tiene batería integrada, simplemente conectando el bajo al sistema creado y colocándolo en la guitarra podrían sonar los dos instrumentos salvando las diferencias de nivel de presión sonora en comparación con un sistema profesional de amplificadores.

Este dibujo muestra cómo sería la conexión:

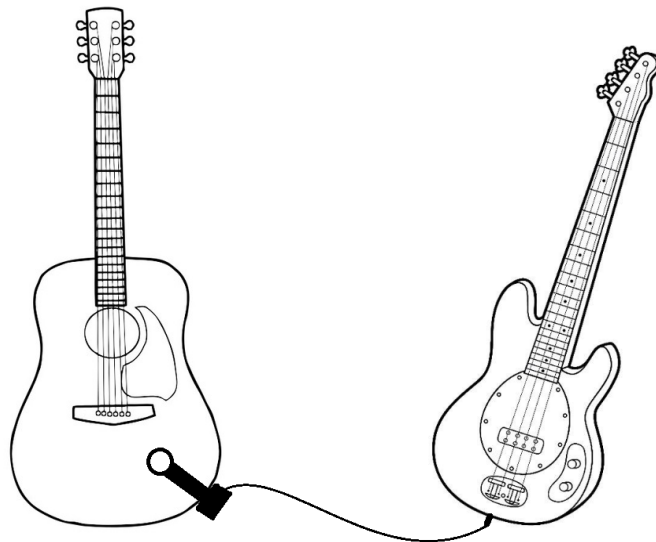


Ilustración 40. Dibujo ilustrativo para conectar un bajo eléctrico.

- Conectar la salida de línea de la propia guitarra a un sistema de pedaleras de efectos para después conectar la salida de esta al dispositivo creado. De esta forma, es la propia guitarra la que reproduce el efecto deseado (*reverb*, *delay*, *echo*, base rítmica...). Esta configuración elimina los amplificadores y altavoces externos y proporciona una experiencia muy agradable al ser la guitarra la que emite los efectos seleccionados.

Este dibujo muestra cómo sería la conexión:

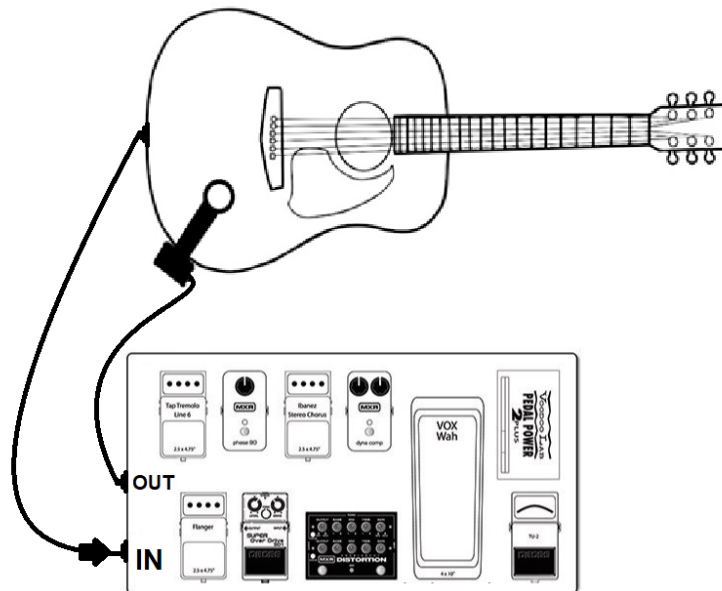


Ilustración 41. Dibujo ilustrativo para conectar una pedalera

- Se puede usar, como ya se ha dicho, como un altavoz normal y corriente para emitir música o cualquier sonido.

Con otra disposición de los componentes, podría ser de gran utilidad para un luthier. Este podría utilizar el transductor para estudiar el comportamiento de nuevas disposiciones de las barras armónicas de la guitarra, diferentes características de las maderas o incluso variar la posición del puente alterando la respuesta de la caja. Es decir, el luthier podría realizar una nueva configuración en las tapas de la guitarra, colocar el transductor donde él crea conveniente y experimentar a partir de los resultados.

Como conclusión final podría decirse que, si bien el dispositivo está en una fase preliminar y funciona correctamente, podría mejorarse de tamaño haciéndolo más pequeño y manejable. También podría incluirse alguna funcionalidad como los efectos sonoros básicos como *reverb* o *delay* incluidos dentro del dispositivo. No obstante, el resultado final es satisfactorio.

Por último, recordar que, como futuras líneas, se podrían adaptar dispositivos similares a otros instrumentos de cuerda. Un instrumento susceptible de poder adaptarse sería el ukelele. Al ser de menor tamaño, el requerimiento de potencia también será menor y posiblemente podrían usarse otros transductores desechados en este proyecto en el caso de la guitarra.

8. Referencias

- Autodesk. (2019). Recuperado el 23 de agosto de 2019, de <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview#banner>
- Avellaneda, G., Guerrero, A., Maldonado, F., & Rodríguez, C. (2015). <https://www.researchgate.net>. Obtenido de Medición de los Parámetros Thiele-Small del Altavoz YUM – YD 158: https://www.researchgate.net/publication/324757190_Medicion_de_los_Parametros_Thiele-Small_del_Altavoz_YUM-YD_158
- Basilio Pueo, J. E. (2019). <https://docplayer.es>. Obtenido de <https://docplayer.es/14281936-Experiencias-de-laboratorio-para-estudiantes-de-ingenieria-acustica-altavoces-planos-de-modos-distribuidos.html>: <https://docplayer.es/14281936-Experiencias-de-laboratorio-para-estudiantes-de-ingenieria-acustica-altavoces-planos-de-modos-distribuidos.html>
- Dx Dealextrême. (23 de agosto de 2019). Obtenido de <https://www.dx.com/p/zhaoyao-2pcs-3-7v-14500-2000mah-rechargeable-lithium-battery-blue-2006774#.XTxLMegzblU>
- Mateljan, I. (febrero de 2007). Recuperado el 23 de agosto de 2019, de <http://www.artalabs.hr/AppNotes/LIMP-ManualDeUsuarioEspanol-1.2.0.pdf>
- Sacerdoti, I. E. (2017). *Equaphon-university*. Recuperado el 23 de agosto de 2019, de <http://www.equaphon-university.net/parametros-thiele-small/>
- Small, R. (1972). Simplified Loudspeaker Measurements at Low Frequencies. *JAES. Volume 20, Issue 1*, pp. 28-33.
- Thiele, A. (1971). Loudspeakers in vented boxes: Part 1. *JAES. Volume 19, Issue 5*, pp. 382-392.
- Thiele, A. (1971). Loudspeakers in vented Boxes: Part 2. *JAES. Volume 19, Issue 6*, pp. 471-483.