

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

CAMPUS DE ALCOY

DEPARTAMENTO DE MECÁNICA DE LOS MEDIOS CONTINUOS Y TEORÍA DE  
ESTRUCTURAS



TESIS FINAL DE MÁSTER

**ESTUDIO VIBROACÚSTICO DE MATERIALES COMPUESTOS  
BIODEGRADABLES COMO SUSTITUTIVOS DE LA MADERA  
PARA INSTRUMENTOS MUSICALES.**

MEMORIA PRESENTADA POR:

SOFIA REBAGLIATO TORREGROSA

DIRECTOR:

JOSÉ MARÍA GADEA BORRELL

CODIRECTOR:

JORGE GABRIEL SEGURA ALCARAZ

ALCOY, 2017

## Contenido

1.	INTRODUCCION.....	6
1.1	MADERAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE GUITARRAS.....	6
1.1.1	PROCEDENCIA, CARACTERÍSTICAS Y USOS DE LAS MADERAS .....	6
1.1.2	CORTE Y TROZEADO DE LA MADERA.....	9
1.1.3	ENFERMEDADES Y SECADO .....	9
1.1.4	ALMACENAJE.....	10
1.2	TIEMPO DE VIDA ÚTIL DE UNA GUITARRA CLÁSICA.....	10
1.3	NUEVOS MATERIALES.....	11
1.4	PSICOACÚSTICA.....	11
1.4.1	SISTEMA AUDITIVO HUMANO.....	11
1.4.2	PARÁMETROS PSICOACÚSTICOS CONVENCIONALES.....	12
2.	OBJETIVO.....	20
2.1	OBJETIVO GENERAL.....	20
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
3.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	22
3.1	MATERIALES UTILIZADOS .....	22
3.2	MONTAJE EXPERIMENTAL.....	23
3.2.1	MONTAJE EXPERIMENTAL 1.....	23
3.2.2	MONTAJE EXPERIMENTAL 2.....	27
4	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	29
4.1	Infusión por vacío.....	33
5	RESULTADOS .....	36
5.1	RESULTADOS ENCUESTA .....	36
5.2	REPRESENTACIÓN FFT MEDIA VS FRECUENCIA (HZ).....	38
5.2.1	RESULTADOS FFT MEDIA – FRECUENCIA (HZ) PARA LAS MADERAS .....	38
5.2.2	GRÁFICA COMPARATIVA FFT MEDIA-FRECUENCIA (HZ) MADERAS.....	42
5.2.3	RESULTADOS FFT MEDIA – FRECUENCIA (HZ) PARA LOS NUEVOS MATERIALES .....	43
5.2.4	GRÁFICA COMPARATIVA FFT MEDIA-FRECUENCIA (HZ) MADERAS.....	44
5.3	CRITERIOS PSICOACÚSTICOS DE LAS MADERAS.....	45
5.4	CRITERIOS PSICOACÚSTICOS DE LOS NUEVOS MATERIALES.....	47
5.5	ESPECTROGRAMAS MADERAS .....	48
5.6	ESPECTROGRAMAS NUEVOS MATERIALES .....	52
5.7	TABLA MULTICRITERIO.....	53
6	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	56
6.1	PESO Y DIMENSIONES .....	56

6.2	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS GRÁFICOS FFT MEDIA-FRECUENCIA(HZ).....	56
6.3	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LAS TABLAS DE CRITERIOS PSICOACÚSTICOS.....	58
6.4	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ESPECTROGRAMAS .....	59
6.5	TABLA MULTICRITERIO .....	60
7	CONCLUSIONES .....	63
8	BIBLIOGRAFÍA.....	65
9	APÉNDICE .....	67
9.1	ÍNDICE DE TABLAS .....	67
9.2	ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	67
9.3	ÍNDICE DE GRÁFICOS .....	68
9.4	ÍNDICE DE ECUACIONES .....	69



# 1. INTRODUCCIÓN

## 1. INTRODUCCION

"La verdadera guitarra de madera está desapareciendo más rápido de lo que se esperaba. Tenemos que actuar rápidamente, ya que en 10 años ya no estará entre nosotros", afirman desde Gibson, que fabrica 2.500 guitarras diarias.

Según la afirmación de Henry Juskiewicz (jefe ejecutivo de Gibson) dentro de 10 años no quedará madera como la de palo rosa, ébano, arce, caoba o abeto, para la fabricación de guitarras de calidad. Hecho que afectará a grandes marcas como: Fender, Gibson, Ibañez...

Todo esto es a causa de la deforestación, lo que desemboca en una búsqueda de nuevos materiales para suplir la falta de estas maderas. Se ha descartado utilizar maderas de baja calidad ya que ésta, en gran medida determina el sonido y la resonancia del instrumento. Por ejemplo, la caoba ofrece un sonido oscuro y el palo rosa tonos brillantes.

Hay una madera, que se encuentra en peligro, que se utiliza para la fabricación de las tapas de guitarra acústica, la del abeto Sitka. Esta madera proviene, en su mayor parte, de la costa sureste de Alaska, que ha sufrido una agresiva deforestación los últimos años.

El documental "Musicwood" habla sobre este problema y además plantea soluciones entre las que se encuentra una coalición de las grandes marcas como: Taylor, Martin, Gibson o Fender, para ayudar a Greenpeace a concienciar a los deforestadores para que cambien sus hábitos y así resolver el problema.

### 1.1 MADERAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE GUITARRAS

Tonewood es la palabra que se utiliza para definir a las maderas que son seleccionadas para hacer instrumentos musicales, es decir, que poseen cualidades óptimas para el sonido y la vibración.

Existen muchos tipos de madera para hacer guitarras, pero nombraremos las más utilizadas: Abeto Alemán, Abeto Engelmann, Abeto Sitka, Cedro Amarillo, Cedro Rojo, Mongoy y Sapelli.

#### 1.1.1 PROCEDENCIA, CARACTERÍSTICAS Y USOS DE LAS MADERAS

- **Abeto Alemán:** En siglos pasados, esta era la madera utilizada para tapas armónicas hasta que aparecieron otras provenientes de América. Ante la escasez hoy en día de piezas de máxima calidad, esta madera solo se utiliza para instrumentos de gama alta como la guitarra clásica o acústica construidos por luthiers.

Una vez acabada, esta madera tiene un color blanco y lustroso, además es capaz de reproducir una amplia gama de colores tonales, bajos definidos y agudos claros, lo que va mejorando con el tiempo y el uso. Al probar una guitarra nueva con esta madera como tapa y que además suena bien, no está mostrando todo su potencial en ese momento, pero si se puede intuir si se trata de una tapa que será aún mejor en un futuro.



*Ilustración 1: Abeto Alemán*

- **Abeto Sitka:** Este tipo de abeto (originario del norte de América y Canadá) es el más duro de todos los abetos que se utilizan para la fabricación de instrumentos musicales. Tiene una gran elasticidad, lo que hace que sea el más utilizado para la construcción de guitarras acústicas.



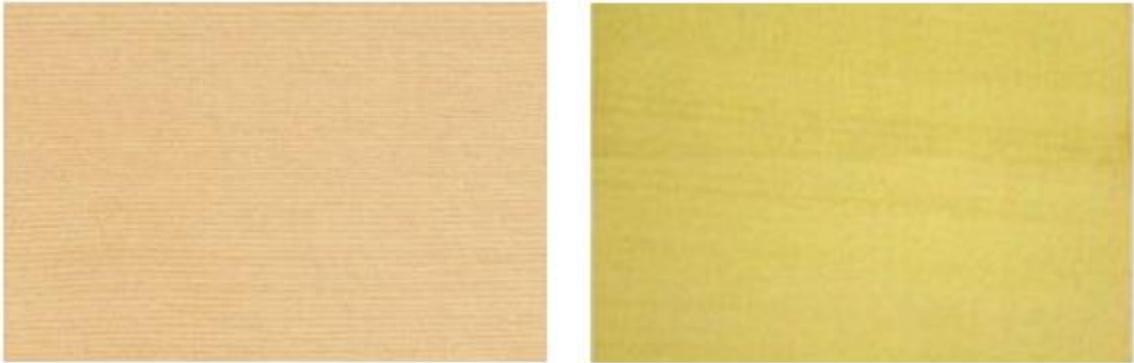
*Ilustración 2: Abeto Sitka*

- **Abeto Engelmann:** En los últimos años ha habido una escasez de tapas de gran calidad de abeto alemán por lo que el Engelmann (proveniente de Canadá en su gran mayoría) le ha ido sustituyendo ya que reúne casi todas las características del mejor abeto alemán. Generalmente las tapas de este tipo de abeto suelen ser mucho más homogéneas en coloración y espacio entre las vetas, siendo un poco más blandas que su competidor centroeuropeo.



*Ilustración 3: Abeto Engelman*

- **Cedro:** El Cedro que más se utiliza actualmente es el procedente de Honduras, aunque el más famoso proviene del Líbano. Esta madera es más blanda y no tan elástica y fuerte como la del abeto. Tiene un tono más claro, directo y vivo al golpearlo. Su riqueza tímbrica ha sido asociada a un sonido de guitarra más español.



*Ilustración 4: Cedro rojo (izquierda) y Cedro amarillo (derecha)*

- **Mongoy:** Esta madera es resistente a algunos ácidos y tiene un color blanco amarillento que finalmente se transforma en gris cuando se seca. Tiene un grano fino y su fibra es entrelazada. Es bastante frecuente que presente zonas de madera con depósitos blanquecinos que se pueden eliminar mediante un lavado con agua caliente. Se encuentra en el oeste y en el centro de África. Sus masas forestales son escasas al igual como su producción y exportación.



*Ilustración 5: Mongoy*

- **Sapelli:** Presenta un color crema y una parte central de color pardo rojizo. Tiene unos radios leñosos finos, con forma ondulada y distribuidos escalonadamente. La fibra es entrelazada con grano de tipo medio (su defecto principal es la posible presencia del grano de cebada). Tiene un olor bastante duradero y que recuerda al del cedro. En algunas ocasiones puede exudar resina. Esta madera se encuentra en el oeste, en el centro y en el este de África donde sus masas forestales, su producción y su exportación son importantes.



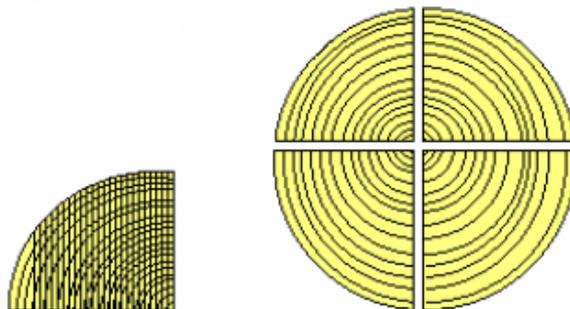
*Ilustración 6: Sapelli*

### 1.1.2 CORTE Y TROZEADO DE LA MADERA

Por norma general la madera para instrumentos se trocea de la siguiente manera:

1. Se corta el tronco en cuatro piezas en sentido longitudinal.
2. Cada una de las piezas se trocean en tablas finas.

Los pasos anteriormente mencionados se pueden ver en la siguiente foto:



*Ilustración 7: Corte y troceado de la madera*

De esta manera se consigue cortar la madera para las tapas y costados de los instrumentos, habiendo troceado con anterioridad el tronco según el tamaño de las piezas.

### 1.1.3 ENFERMEDADES Y SECADO

Los árboles y las plantas están expuestas a las leyes de la naturaleza lo que implica que lo estén también a las enfermedades.

Algunos de los causantes de estas enfermedades pueden ser:

- Descomposición del tejido fibroso causado por la polilla, la plétora vegetal, el caldeamiento y el chancro o úlcera.
- Acción de los agentes atmosféricos, como puede ser la doble albura o anillo lunar provocada por las fuertes heladas, las colainas, las rajadas causadas por las heladas, torsión de las fibras por la acción del viento y el sámago.

- Acción de las plantas parásitas, insectos, etc. Por la exfoliación, tumores, lupias, exostosis o abscesos, la herrumbre, los musgos y líquenes y el enmohecimiento.

Existen varias formas de secar la madera entre las que destacan:

- Desecación natural.
- Inmersión en agua.
- Desecación artificial.
- Por el procedimiento Bethell.
- Procedimiento Paya.
- Procedimiento Inglés.
- Procedimiento V. Fréret.
- Procedimiento Kyan.
- Por carbonización.
- Alquitrinado.
- Carbolineum.
- Microsol.

La desecación natural (el sistema más antiguo que se conoce) es el sistema mejor considerado para procesar guitarras. Para determinadas zonas (España, Francia, Italia y el Mediterráneo) se procede a la corta de la madera en la época de mínima circulación de la savia, es decir, del 15 de noviembre al 15 de diciembre.

Para proceder a la exposición al aire se necesita limpiar las maderas. Se tiene que quitar las partes alteradas y vaciar los nudos podridos e impregnarlos de alquitrán.

El paso siguiente consiste en apilar las maderas interponiendo espolines (piezas varillas de pequeñas dimensiones) para que el aire pueda circular por todas las caras. Las primeras maderas se colocan bastante elevadas del suelo para que la humedad del suelo no influya en ellas. Las maderas se colocan en tinglados que pueden cerrarse por algunos lados según la dirección del viento de la región en la que se realiza el secado. A falta de este elemento las maderas se pueden cubrir con costeros, pajas o esteras. Este proceso dura tres años, pasados estos, ya están listas para ser utilizadas.

#### 1.1.4 ALMACENAJE

El proceso de almacenaje es muy importante para que la madera esté bien conservada y seca. La situación idónea sería trocear la madera en las piezas que se precisan para su uso, debido a que cuanto menor sea su tamaño más fácil serán de secar. Luego se cuelgan una a una verticalmente de la veta, se debe dejar un espacio de más o menos cinco centímetros para que el aire pueda circular. Los graneros suelen ser los sitios más recomendados porque no suelen ser húmedos y generalmente están bien aireados. Cuanto más tiempo se tengan colgadas mejor condición acústica se conseguirá, aunque como mínimo el secado debe de ser de tres meses sin forzar el proceso al sol ni con cualquier otro proceso.

## 1.2 TIEMPO DE VIDA ÚTIL DE UNA GUITARRA CLÁSICA

La vida útil de una guitarra viene determinada por el cuidado que se tenga con ella. Por ejemplo, el evitar la humedad en la guitarra evita que la tapa se doble por la presión de las cuerdas, cosa

que provoca que se alejen del diapasón y se vuelva más dura de tocar. Con el paso del tiempo un instrumento de cuerda mejora su sonido si es tocado constantemente ya que esto provoca que las fibras de la madera se adapten a la vibración y propaguen mejor el sonido. Una superficie con bajos índices de humedad propaga el sonido más rápido, en la madera el proceso de secado no termina cuando el instrumento está acabado, lleva años de proceso natural.

### 1.3 NUEVOS MATERIALES

En diferentes artículos hablan de que se está llevando a cabo un estudio exhaustivo para encontrar un nuevo material con el que sustituir la madera con la que se fabrican las guitarras de alta calidad. El cedro japonés es firme candidato a sustituir la madera del palo rosa brasileño el cual se encuentra en baja disponibilidad. Este material se crea a partir de una máquina de torneado rotatorio de un diámetro de 20cm y un espesor de 2mm. Las chapas resultantes se bañan con una resina fenólica de bajo peso molecular, se lamina en paralelo y por último se comprimen perpendicularmente.

Para la fabricación de cajas de resonancia, el policarbonato espumado es un material muy innovador el cual puede competir con la calidad de las contraparedes de madera. Este material tiene propiedades físicas diferentes a la madera dando un rendimiento acústico equivalente.

También se están considerando maderas del mismo nivel de calidad, pero de distinta procedencia como puede ser la madera de Arce de Eslovaquia. Mediante un sistema llamado Akustomat se han estudiado las características fisicoacústicas de dicha madera comparándola con la procedente de África, América y la caoba y el palo rosa de India. Se han obtenido resultados satisfactorios para determinados tipos de acústica como por ejemplo la guitarra española y la guitarra para Jazz.

Otra posibilidad que se está barajando es la de utilizar maderas de zonas tropicales en lugar de las de zona templada. Estas maderas se podría utilizar para carrillas para pianos o cuellos de guitarra, pero no cuando se precisa de una alta dureza, densidad, módulo de Young alto y bajo amortiguamiento.

### 1.4 PSICOACÚSTICA

En este apartado se detallará brevemente el funcionamiento del sistema auditivo humano para poder entender posteriormente los parámetros psicoacústicos convencionales.

#### 1.4.1 SISTEMA AUDITIVO HUMANO

El sistema auditivo humano se divide en tres partes: el oído externo, medio e interno. Cuyas funciones son la de recepción sonora, transmisión del sonido y percepción del sonido respectivamente.

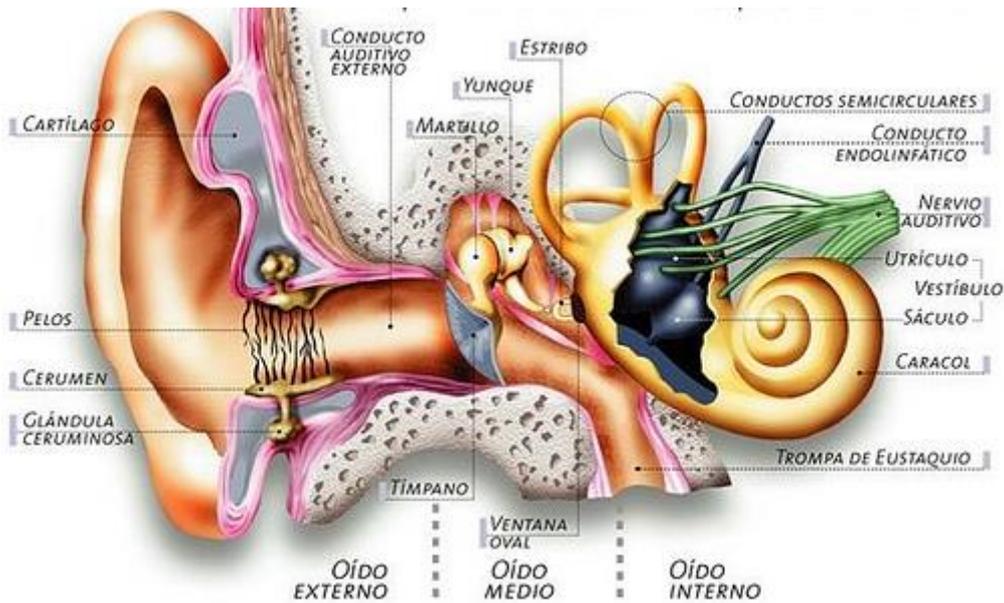


Ilustración 8: Sistema auditivo humano

#### 1.4.2 PARÁMETROS PSICOACÚSTICOS CONVENCIONALES

Los parámetros psicoacústicos son magnitudes sensoriales que se toman como características de la audición humana. Los más habituales son: la sonoridad, la agudeza, la rugosidad y la tonalidad.

##### 1.4.2.1 SONORIDAD

La sonoridad es una medida subjetiva del efecto del contenido energético de un sonido percibido por el oído. Está relacionada con el decibelio, que es el atributo que permite ordenar la escala logarítmica del más fuerte al más débil.

El decibelio es una magnitud física utilizada para medir los niveles de sonido, aunque no es capaz de guardar relación alguna con la intensidad de un sonido debido a que esta depende del contenido frecuencial del mismo. Para poder medir esta magnitud se reúne a un grupo de personas, a las cuales se les muestra una serie de estímulos anotando sus reacciones. Al finalizar se analizan los resultados llegando a una conclusión que nos reporta una ley empírica.

Se define la intensidad subjetiva de un sonido de forma relativa, es decir, comparando la sensación originada por un sonido con la de otro. Se puede decir que tienen la misma intensidad subjetiva si los dos producen la misma sensación de intensidad. Esta comparación se realiza con una referencia de tono de 1 KHz de frecuencia y de nivel de presión sonora ajustable.

La definición de la sonoridad por Zwicker y Fastl es el nivel de presión sonora de un tono con frecuencia de 1 KHz en un tubo de onda plana e incidencia frontal que debe sonar igual de fuerte que el sonido a ser analizado, la unidad de medida es el fonio. Por lo que un sonido que suena

igual de fuerte que un tono con 1KHz con un nivel de presión de 40dB resulta tener un nivel de sonoridad de 40 fonios.

Al duplicar la sonoridad, se duplica la sensación de intensidad experimentada.

La deducción experimental de Fletcher y Munson fue la relación que existe entre el nivel de presión sonora, el nivel de sonoridad y la frecuencia sobre un gran número de jóvenes con audición normal y edades de entre dieciocho y veinticinco años. Las curvas resultantes reciben el nombre de líneas isofónicas y presentan los niveles sonoros (sonoridad) que necesita alcanzar un sonido sinusoidal con una frecuencia  $f$  para producir la misma sensación auditiva que un sonido sinusoidal de 1.000 Hz y un nivel de presión sonora dado (Ilustración 9).

NIVEL DE  
PRESION SONORA  
(dB)

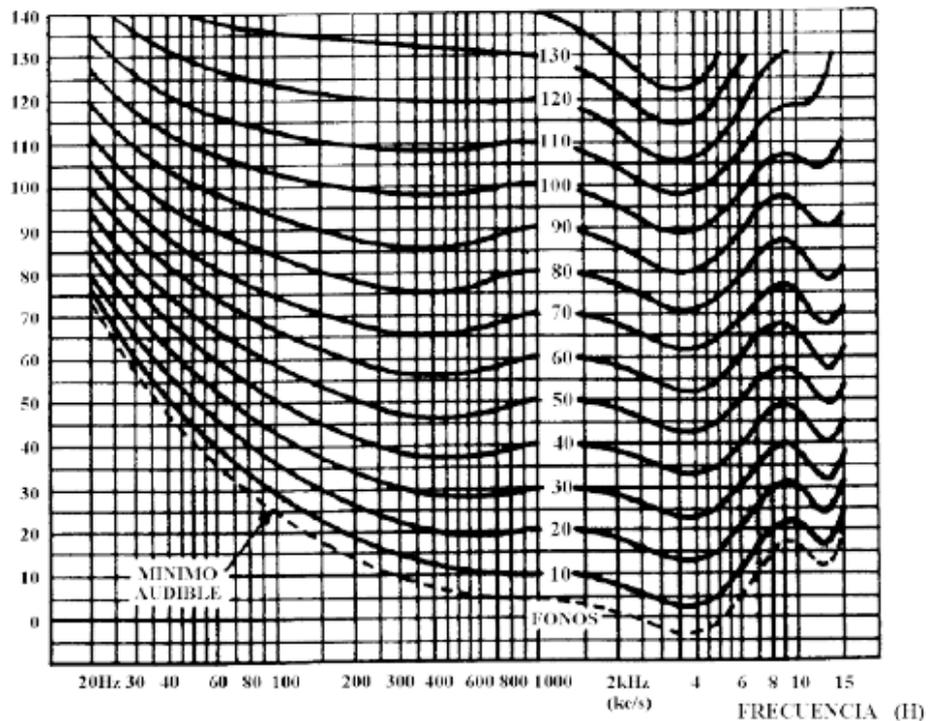


Ilustración 9: Curvas de igual nivel sonoro (ISO R226)

El valor que pone el umbral para bajas frecuencias es de 60 dB, pero a medida que la frecuencia aumenta, el oído alcanza una mayor sensibilidad siendo la máxima en 3000Hz, al superarlos se necesita un nuevo aumento de presión sonora.

La unidad de sonoridad definida por Zwicker y Fastl, el fonio, depende de datos experimentales, por lo que se obtiene una gran imprecisión y no responde a ningún principio matemático ni escala de medida fija. Es por esto que Fletcher, Robison y otros elaboraron una nueva escala subjetiva: el son o sonio. Para elaborar esta nueva escala se basaron en observaciones como: la audición de un sonido con los dos oídos da una sensación de sonoridad dos veces más destacada que la audición del mismo sonido con un solo oído; que con dos sonidos de frecuencias muy diferentes escuchados al mismo tiempo se estimulan porciones diferentes de la membrana basilar, lo que hace actuar la respuesta subjetiva en forma auditiva.

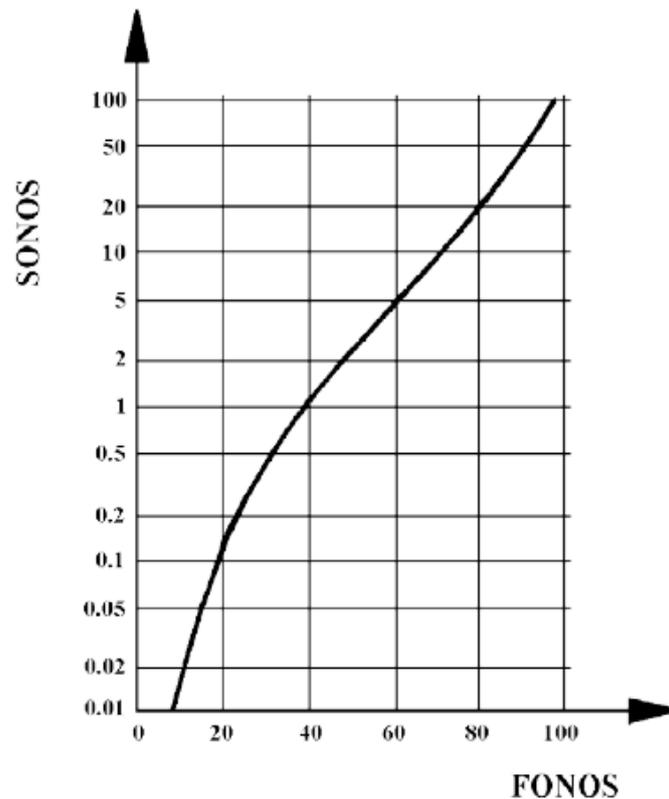
Con los fonos (unidad fisiológica) y sonos (unidad subjetiva) se establece una escala subjetiva de intensidades (nivel de sonoridad) y con ello se traza una curva de correlación entre ellos (Ilustración 10).

Se puede determinar la equivalencia entre el número de sonos y número de fonos, esta equivalencia viene dada por la siguiente expresión:

$$S = 2^{\frac{F-40}{10}}$$

*Ecuación 1: Relación entre sonos y fonos*

De esta forma se fija al sono como una unidad de sonoridad y se define como la sonoridad de un tono de 1.000 Hz y 40 dB de nivel de presión sonora.



*Ilustración 10: Curva de correlación entre fonos y sonos.*

#### 1.4.2.2 AGUDEZA

La agudeza mide el contenido frecuencial de un sonido. Un sonido será más agudo cuanto mayor sea la proporción de las altas frecuencias.

Un sonido de agudeza 1 acum Zwicker y Fastl lo definen como un ruido de banda estrecha, de ancho de banda inferior a una banda crítica, centrado en la frecuencia de 1 KHz, y que tiene un nivel de 60 dB.

### 1.4.2.3 RUGOSIDAD

Para cuantificar la percepción subjetiva de las rápidas modulaciones de amplitud (15-300 Hz) de un sonido se utiliza la rugosidad.

Se utiliza el asper como unidad que cuantifica la aspereza, por ejemplo, un evento auditivo tiene una aspereza de 1 asper cuando se percibe igual de áspero que un tono de 60 dB de nivel de presión sonora y frecuencia central 1kHz, 100% de amplitud y frecuencia de modulación de 70 Hz.

La aspereza va a depender del grado de modulación, de la frecuencia de modulación y del nivel de presión sonora.

La aspereza de un tono de frecuencia central de 1kHz depende del grado de modulación, tomado en tanto por uno, como muestra la ilustración 11. Se puede observar en los ejes una relación aproximadamente lineal, y dado que la escala de estos es doblemente logarítmica, esta relación puede representarse con una ley exponencial de exponente aproximado de 1'6. Los valores de aspereza menores de 0'1 asper, los cuales se han obtenido para grados de modulación de 0'2 se suelen clasificar como no ásperos. La relación obtenida para señales de 1kHz de frecuencia central también es válida para señales de frecuencias centrales diferentes.

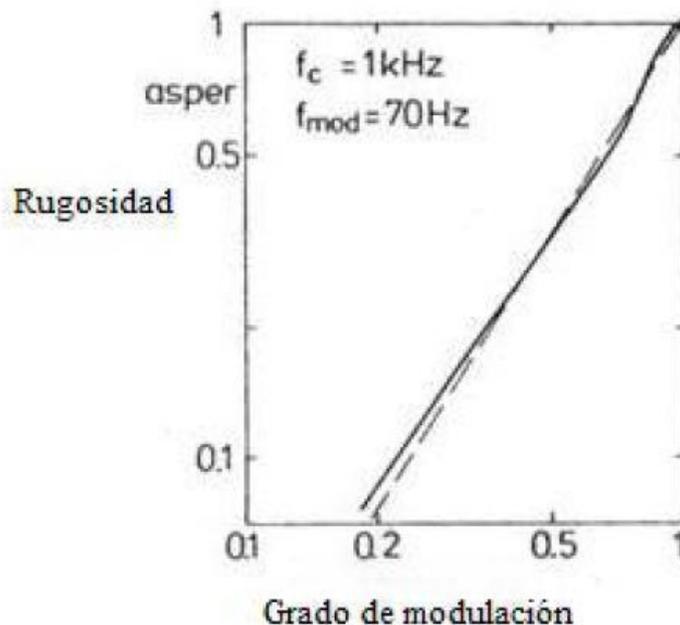


Ilustración 11: Rugosidad en función del grado de modulación

Para obtener distintas curvas según la frecuencia central considerada, se ha de estudiar la dependencia de la aspereza con la frecuencia de modulación. La Ilustración 12 muestra la dependencia de la aspereza con la frecuencia de modulación, cuando el grado de modulación es 1, para distintas frecuencias centrales. Se ha representado ejes doblemente logarítmicos en los que la aspereza crece casi linealmente hasta llegar a un máximo que para las frecuencias centrales inferiores a 1 kHz depende de la misma frecuencia central y que para frecuencias centrales superiores se alcanza con frecuencias de modulación de alrededor de 70 Hz. Como se puede ver en la figura 12, independientemente de la frecuencia central todas las ramas son

respectivamente paralelas. Por otra parte, el máximo absoluto de aspereza se obtiene exclusivamente en la curva de frecuencia central 1kHz, disminuyendo la aspereza máxima conforme la frecuencia central se aleja de dicho valor.

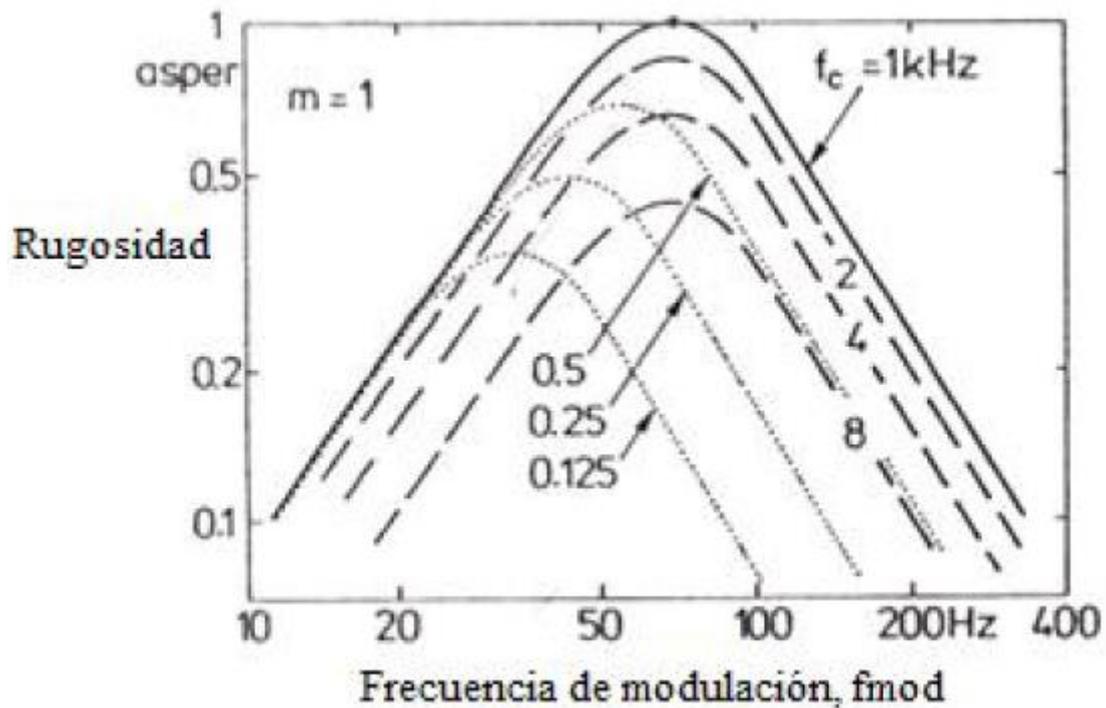


Ilustración 12: Rugosidad en función de la frecuencia de modulación

Se ha demostrado en estudios sistemáticos que en los tonos modulados en frecuencia FM se obtienen los mayores valores de la aspereza siempre y cuando las frecuencias de modulación estén alrededor de 70Hz como sucede con la modulación en amplitud. De igual modo, la aspereza de los tonos modulados FM va a ser imperceptible para frecuencias de modulación superiores a 300Hz.

En referencia a la dependencia de la aspereza con el nivel de presión sonora se puede observar que un incremento de 40 dB ocasiona que se multiplique por 3 la aspereza. Esto es aplicable para tonos e incluso ruidos de banda estrecha modulados en amplitud o en frecuencia.

El incremento de la aspereza es perceptible en el momento en que se da un incremento del grado de modulación del 10% (17% en términos de aspereza). El umbral inferior de aspereza para la modulación en amplitud (en tonos de 1kHz y modulados a 70Hz) se alcanza para valores de 0'07 asper y el límite superior de aspereza se sitúa alrededor de 1 asper. Entre este intervalo el sistema auditivo puede percibir en torno a 20 escalones diferentes de aspereza.

Se puede producir una diferencia de aspereza entre los tonos modulados en frecuencia y los modulados en amplitud siendo mayores los primeros, por ejemplo, una fuerte modulación en frecuencia a lo largo de todo el rango de frecuencias audible produce una aspereza cercana a 6 asper. En la Ilustración 13 se muestra la dependencia de la rugosidad (en tonos modulados en frecuencia) con la desviación máxima en frecuencia  $\Delta f$ . Concretamente se representan los resultados de un tono centrado en 1500 Hz, modulado a 70 Hz y con un nivel de 70 dB. Como se puede ver en la ilustración para valores de  $\Delta f$  mayores de 50Hz, la rugosidad aumenta linealmente con el logaritmo de  $\Delta f$ .

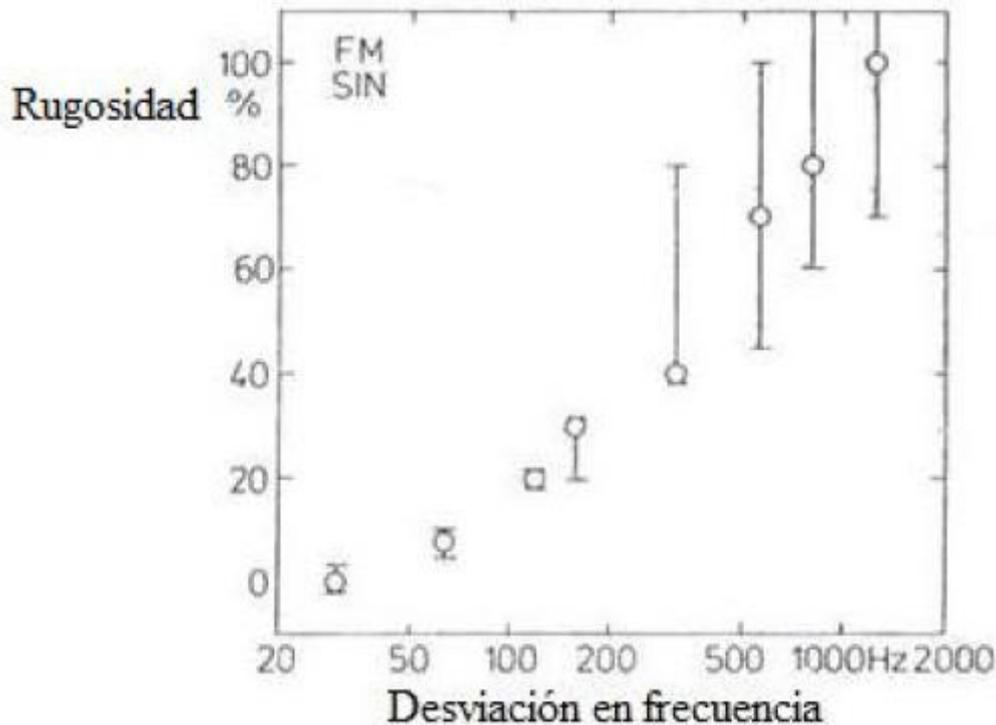


Ilustración 13: Rugosidad en función de la desviación en frecuencia

#### 1.4.2.4 TONALIDAD

La tonalidad es la cualidad que permite ordenar un sonido en una escala de bajo a alto. eso depende principalmente de la frecuencia del sonido, aunque también de la presión sonora y la forma de la onda del sonido.

Es una magnitud subjetiva a diferencia de la frecuencia que es una magnitud física medible y no guardan una relación, aunque la tonalidad aumente o disminuya cuando lo hace la frecuencia. La variación en el tono se corresponde con la variación de frecuencia en términos de octava en la zona de frecuencias media. Al pasar de un tono de 1.000 Hz a otro de 2.000 Hz se recorre una octava, no siendo la misma sensación experimentada al pasar de 7.000 Hz a 8.000 Hz aún aumentado para los dos casos 1.000 Hz. Para percibir un efecto subjetivo diferente al primero se debería recorrer otra octava, es decir, pasar de 7.000 Hz a 14000 Hz.

La división del espectro de audio en octavas no se ajusta exactamente a la respuesta del oído, dado que se ha demostrado en un procedimiento experimental que existen unas octavas subjetivas que difieren de las octavas físicas. Se ha realizado unos procedimientos estadísticos en los cuales se ha fijado el valor de la octava subjetiva mediante una ley empírica definiendo una nueva escala de tonos. La unidad mel (ANSI S3.20-1973) es utilizada para medir los intervalos de esa escala, por ejemplo, se ha definido que un sonido de 1.000 Hz de frecuencia y 40 decibelios de nivel de presión sonora tiene un tono de 1.000 mels. En las frecuencias medias en la zona inferior cada octava tiene una extensión de 200 mels, del mismo modo para frecuencias más altas las octavas tienen extensiones mayores (alrededor de 700 mels). El intervalo de entre 0 y 16 kHz contiene 2.400 mels.

La membrana basilar explica este comportamiento ya que sonidos separados igualmente en mels producen excitaciones en puntos de la membrana que están separados entre sí de manera también uniforme. Lo que significa que existe una relación directa entre la escala mel y la localización en la membrana basilar de los puntos sensibles de las diversas frecuencias. La escala de mel es puramente subjetiva (variará con cada individuo) ya que un intervalo de unos 100 mels corresponde aproximadamente a un milímetro de la membrana.

El bark es otra medida de audio distinta, lineal en tono subjetivo. La relación aproximada es de un bark equivale a 100 mels lo que significa que la banda de audio comprende unos 24 bark. En las frecuencias centrales de estas bandas de ancho (1 bark) se encuentran irregularmente repartidas entre los 50 y los 13.500 Hz. El ancho de banda de cada una varía entre 100 y 3.500 Hz.

#### 1.4.2.5 SENSACIÓN DE AGRADO

Los parámetros psicoacústicos anteriormente descritos (sonoridad, agudeza, tonalidad y rugosidad) dan una percepción de la naturaleza del ruido y de su percepción en el individuo. De todas maneras, es interesante la posibilidad de obtener una descripción general por lo que Zwicker propuso un nuevo parámetro llamado sensación de agrado, el cual se utiliza para medir la calidad del sonido. Este parámetro se entiende como agradabilidad o pleasantness, que puede ser cuantificado mediante la siguiente fórmula:

$$\frac{P}{P_0} = e^{-0,7 \frac{R}{R_0}} \cdot e^{-1,08 \frac{S}{S_0}} \cdot (1,24 - e^{\frac{2,43 T}{T_0}}) \cdot e^{-\frac{(0,023 N)^2}{N_0}}$$

*Ecuación 2: Sensación de agrado*

Donde P es agradabilidad, R aspereza, S agudeza, T tonalidad y N sonoridad percibida.

## 2. OBJETIVO

## 2. OBJETIVO

Los objetivos que se plantean para este proyecto, se pueden distinguir en dos grandes grupos:

### 2.1 OBJETIVO GENERAL

En el presente proyecto se van a estudiar las características vibroacústicas de materiales biodegradables que puedan sustituir a la madera en la fabricación de instrumentos musicales.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Los objetivos específicos del proyecto son los siguientes:

- Comparativa de los resultados obtenidos al representar gráficamente las FFT media frente a la frecuencia (Hz).
- Realización de tablas con los parámetros psicoacústicos pertinentes a cada material para poder comparar todos los materiales.
- Análisis de los espectrogramas de las maderas y los nuevos materiales.
- Elaboración de una tabla multicriterio para detectar que material presenta un comportamiento más parecido al de la madera.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 MATERIALES UTILIZADOS

Los materiales a utilizar para desarrollar el siguiente estudio, han sido:

- Láminas de diferentes tipos de maderas:

Nombre	Dimensiones	Peso
Abeto Alemán	260mmx260mmx2,8mm	61,49 g
Abeto Sitka	250mmx250mmx2,8mm	48,03 g
Abeto Engelmann	260mmx260mmx2,9mm	58,10 g
Cedro rojo	250mmx250mmx2,5mm	44,18 g
Cedro amarillo	250mmx250mmx2,5mm	46,71 g
Mongoy	210mmx210mmx2mm	71,23 g
Sapelli	230mmx230mmx2,2mm	72,63 g

Tabla 1: Dimensiones y pesos de las chapas de madera utilizadas

- Fabricación de nuevos materiales:

Nombre	Dimensiones	Peso
Borra	202mmx199mmx2,5mm	109g
Cáñamo	201mmx200mmx4,5mm	193g
Yute	199mmx198mmx3mm	140g

Tabla 2: Dimensiones y pesos de los nuevos materiales fabricados

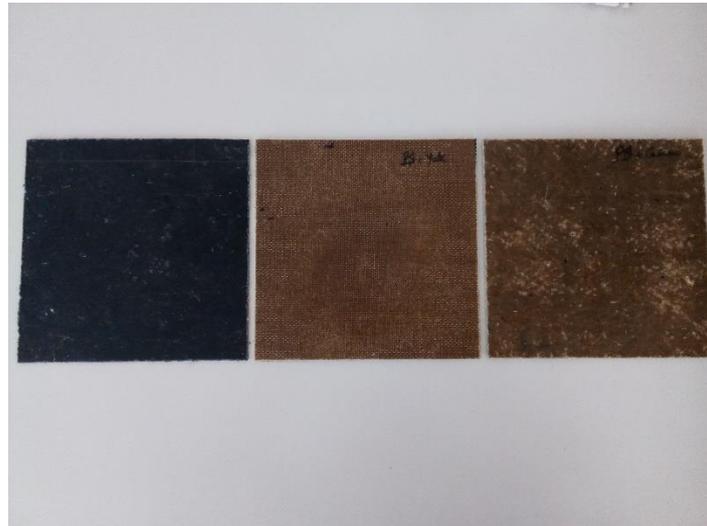


Ilustración 14: Nuevos materiales

Los nuevos materiales son materiales compuestos fabricados a partir de una resina de poliestireno estándar y su respectivo material, en este caso borra, cáñamo y yute.

## 3.2 MONTAJE EXPERIMENTAL

### 3.2.1 MONTAJE EXPERIMENTAL 1

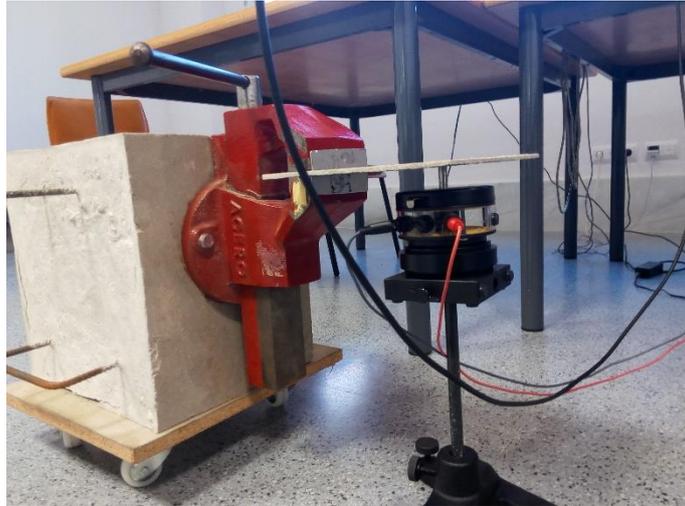


Ilustración 15: Montaje experimental 1

Dónde: 1 – Soporte para sujetar el micrófono

2- Micrófono omnidireccional (BRUEL KJAER TYPE 4957): Los micrófonos omnidireccionales tienen un diagrama polar de 360°. Su respuesta a la sensibilidad es constante, pueden captar todos los sonidos independientemente de la dirección desde donde lleguen. Su principal inconveniente es que además de captar lo que interesa, también capta el ruido externo, reflexiones acústicas, etc. La respuesta omnidireccional, aunque debería ser uniforme, no lo es. Responde mejor ante frecuencias bajas y medias que antes las altas. Para conseguir una respuesta óptima, se debe situar la fuente en torno a los 45°.

3- Shaker (Mechanical vibrator de máximo 1A PASCO Scientific SF-9324): Vibrador electrodinámico que genera vibraciones para el análisis o ensayo de vibraciones en componentes, piezas y sistemas discretos. Dependiendo del nivel de vibración de cada equipo, existen modelos de alto rango, que permiten generar fuerzas dinámicas para el análisis modal en grandes estructuras y ver así la respuesta de dicha estructura a diferentes frecuencias. Estos equipos se utilizan principalmente para el análisis sísmico, dinámica estructural, mecánica estructural, búsqueda de frecuencias de resonancia, etc.



*Ilustración 16: Shaker*

4- Material a estudiar.

5- Soporte de hormigón para sujetar el material.

6- Tarjeta de adquisición de datos (NI USB 9162): Consiste en tomar un conjunto de señales físicas, convertirlas en tensiones eléctricas y digitalizarlas de manera que se puedan procesar en una computadora o PAC (Programmable Automation Controller). Se requiere una etapa de acondicionamiento, que adecua la señal a niveles compatibles con el elemento que hace la transformación a señal digital. El elemento que hace dicha transformación es el módulo de digitalización o tarjeta de adquisición de datos (DAQ).

7- Generador de funciones (PASCO Model P00079402): El generador de funciones es un equipo capaz de generar señales variables en el dominio del tiempo para ser aplicadas posteriormente sobre el circuito bajo prueba.



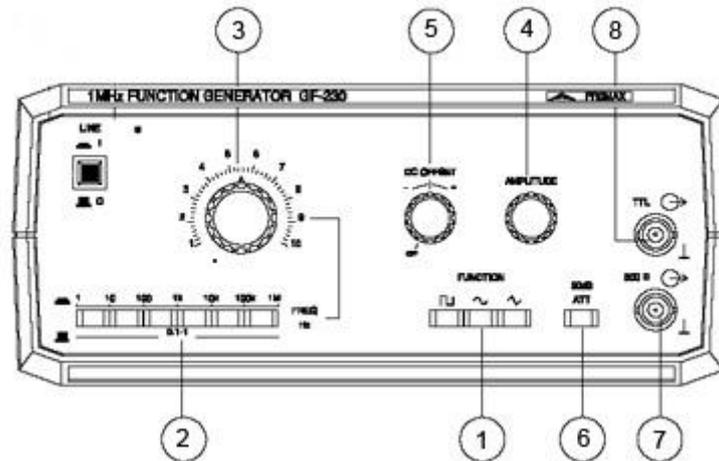
*Ilustración 17: Equipo generador de funciones*

Las formas de onda típicas son las triangulares, cuadradas y senoidales. También son muy utilizadas las señales TTL que pueden ser utilizadas como señal de prueba o referencia en circuitos digitales.

Otras aplicaciones del generador de funciones pueden ser las de calibración de equipos, rampas de alimentación de osciloscopios, etc

## DESCRIPCIÓN:

Aunque existen multitud de generadores de funciones de mayor o menor complejidad todos incorporan ciertas funciones y controles básicos que se describen a continuación.

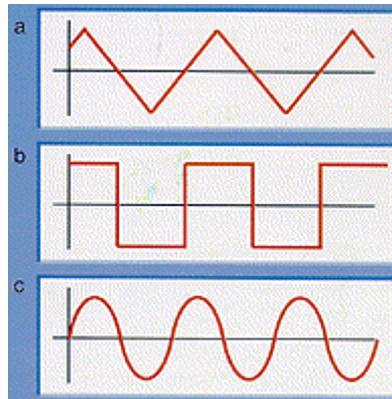


*Ilustración 18: Funciones y controles básicos para describir su funcionamiento*

1. Selector de funciones. Controla la forma de onda de la señal de salida. Como comentábamos puede ser triangular, cuadrada o senoidal.
2. Selector de rango. Selecciona el rango o margen de frecuencias de trabajo de la señal de salida. Su valor va determinado en décadas, es decir, de 1 a 10 Hz, de 10 a 100, etc.
3. Control de frecuencia. Regula la frecuencia de salida dentro del margen seleccionado mediante el selector de rango.
4. Control de amplitud. Mando que regula la amplitud de la señal de salida.
5. DC offset. Regula la tensión continua de salida que se superpone a la señal variable en el tiempo de salida.
6. Atenuador de 20dB. Ofrece la posibilidad de atenuar la señal de salida 20 dB (100 veces) sobre la amplitud seleccionada con el control número 4.
7. Salida 600ohm. Conector de salida que entrega la señal elegida con una impedancia de 600 ohmios.
8. Salida TTL. Entrega una consecución de pulsos TTL (0 - 5V) con la misma frecuencia que la señal de salida.

## UTILIZACIÓN:

Lo primero que se debe hacer es seleccionar el tipo de señal de salida que se necesita (triangular, cuadrada o senoidal).



*Ilustración 19: Tipo de señal de salida (a-triangular, b-cuadrada o c-senoidal)*

A continuación, se debe fijar la frecuencia de trabajo utilizando los selectores de rango y mando de ajuste. Muchos generadores de funciones modernos incorporan contadores de frecuencia que permiten un ajuste preciso, no obstante, y en caso de ser necesario se pueden utilizar contadores de frecuencia externos, osciloscopios o incluso analizadores de espectros para determinar la frecuencia con mayor precisión.

El siguiente paso será cargar la salida y fijar la amplitud de la señal, así como la tensión continua de offset siempre que sea necesaria, como en el caso del ajuste de frecuencia podemos utilizar distintos equipos de medida para ajustar el valor de amplitud. Para niveles de potencia bajos será necesario activar el atenuador interno del generador.

Para evitar deformaciones en las señales de alta frecuencia es indispensable cuidar la carga de salida, evitar capacidades parásitas elevadas y cuidar las características de los cables.

### 8- Ordenador dónde se registran los resultados obtenidos.

Para digitalizar los resultados, se ha desarrollado un algoritmo mediante el programa Matlab, con el cual se obtienen los datos necesarios para el estudio de los mismos.

El código recoge toda la información de cada muestra y la procesa para obtener un fichero de audio, una representación gráfica de la función fft, junto con una tabla Excel con los datos obtenidos de la misma y una representación gráfica del espectrograma obtenido.

Las condiciones de muestreo han sido:

Frecuencia de muestreo de 25000Hz.

Intervalo de recogida de muestras de 125.000 ms.

Para procesar la señal, se recogen los datos como una entrada analógica y se dividen por la constante del micro para convertirlos en Pascales.

### 3.2.2 MONTAJE EXPERIMENTAL 2



Ilustración 20: Montaje experimental 2

Para realizar el segundo experimento, se necesita el montaje experimental que se puede observar en la imagen. Además de los utensilios mencionados anteriormente, se van a utilizar:

1- Soporte y gomas para sujetar el tubo de cartón

2- Tubo de cartón de (60x6) cm: El tubo de cartón está situado a 5cm del centro de la plancha y con un ángulo de 10°.

3- Bolas de acero 17 mm y 10 mm de diámetro

4- Napa textil para amortiguar el impacto de las bolas al caer y evitar, de esta manera, el ruido del impacto.

## 4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

## 4 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En primer lugar, se han realizado los experimentos pertinentes para obtener las características físicas, tecnológicas y mecánicas de las distintas láminas de madera. Obteniendo los resultados siguientes:

		ABETO ALEMÁN	ABETO ENGELMANN	ABETO SITKA
PROPIEDADES FÍSICAS	DENSIDAD	450 kg/m3. Madera ligera	350-410 kg/m3. Madera ligera	400-450 kg/m3. Madera ligera
	DUREZA (Chaláis-Meudon)	1'5. Madera blanda	1'3. Madera blanda	1'4. Madera blanda
	TENDENCIA A CURVARSE	Grande. Madera persistente	Grande. Madera persistente	Grande. Madera persistente
PROPIEDADES TECNOLÓGICAS	SERRADO	Muy buena	Muy buena	Muy buena
	CLAVADO	Buena	Buena	Buena
	ATORNILLADO	Buena	Buena	Buena
	ENCOLADO	Muy buena	Muy buena	Muy buena
	ACABADO	Buena	Buena	Buena
PROPIEDADES MECÁNICAS	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN	710 kg/cm2	615 kg/cm2	663 kg/cm2
	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	450 kg/cm2	390 kg/cm2	420 kg/cm2
	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	650 kg/cm2	563 kg/cm2	607 kg/cm2
	MÓDULO DE ELASTICIDAD	110.000 kg/cm2	95.000 kg/cm2	103.000 kg/cm2

Tabla 3: Propiedades físicas, tecnológicas y mecánicas del Abeto Alemán, Engelmann y Sitka.

		CEDRO AMARILLO	CEDRO ROJO
PROPIEDADES FÍSICAS	DENSIDAD	350 kg/m3. Madera ligera	370 kg/m3. Madera ligera
	DUREZA (Chaláis-Meudon)	1'2. Madera blanda	1'3. Madera blanda
	TENDENCIA A CURVARSE	Pequeña. Madera persistente	Pequeña. Madera persistente
PROPIEDADES TECNOLÓGICAS	SERRADO	Muy buena	Muy buena
	CLAVADO	Muy buena	Muy buena
	ATORNILLADO	Muy buena	Muy buena
	ENCOLADO	Muy buena	Muy buena
	ACABADO	Muy buena	Muy buena
PROPIEDADES MECÁNICAS	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN	501 kg/cm2	530 kg/cm2
	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	293 kg/cm2	310 kg/cm2
	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	416 kg/cm2	440 kg/cm2
	MÓDULO DE ELASTICIDAD	76.000 kg/cm2	80.000 kg/cm2

Tabla 4: Propiedades físicas, tecnológicas y mecánicas del Cedro amarillo y rojo.

		MONGOY	SAPELLI
PROPIEDADES FÍSICAS	DENSIDAD	800 kg/m3. Madera muy pesada	680 kg/m3. Madera de peso medio
	DUREZA (Chaláis-Meudon)	8'5. Madera dura	3'9. Madera semi-dura
	TENDENCIA A CURVARSE	Grande. Madera nerviosa	Pequeña. Madera semi-nerviosa
PROPIEDADES TECNOLÓGICAS	SERRADO	Buena	Buena
	CLAVADO	Buena	Muy buena
	ATORNILLADO	Buena	Muy buena
	ENCOLADO	Muy buena	Muy buena
	ACABADO	Muy buena	Muy buena
PROPIEDADES MECÁNICAS	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN	1.550 kg/cm2	1.150 kg/cm2
	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	690 kg/cm2	590 kg/cm2
	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	140 kg/cm2	860 kg/cm2
	MÓDULO DE ELASTICIDAD	157.000 kg/cm2	120.000 kg/cm2

Tabla 5: Propiedades físicas, tecnológicas y mecánicas del Mongoy y Sapelli.

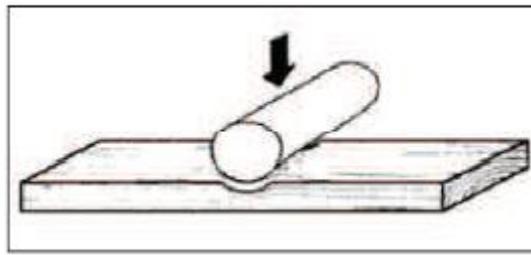
La tabla se ha separado en función del tipo de maderas para poderlas comparar tanto en su conjunto como dentro de una misma familia.

En primer lugar, se hablará de la familia de los abetos. En esta tabla se pueden observar los tres tipos de abetos que se han utilizado, Abeto Alemán, Engelmann y Sitka. Sus densidades están comprendidas en un mismo rango entre los 350- 450 kg/m<sup>3</sup>. Siendo el Abeto Engelmann el de menor densidad (350-410 kg/m<sup>3</sup>), seguido del Abeto Sitka (400-450 kg/m<sup>3</sup>) y por último el Abeto Alemán como el que presenta una mayor densidad de los tres (450 kg/m<sup>3</sup>).

En cuanto a la dureza, es directamente proporcional a la densidad de cada material. Como el Abeto Engelmann es el que presenta una menor densidad (350-410 kg/m<sup>3</sup>), tendrá una menor dureza (1'3 Madera blanda), mientras que el Abeto Alemán al presentar una mayor densidad (450 kg/m<sup>3</sup>), tiene una mayor dureza (1'5 Madera blanda). No obstante, los tres tipos de abetos se consideran como madera de tipo blanda, ya que su dureza se mantiene en los 1'5 como máximo.

Cabe destacar que la dureza indica la resistencia que tiene un material al rayado o desgaste. Algunos de los factores que pueden afectar a la dureza de una madera pueden ser: la densidad, como se ha comentado anteriormente, la orientación de sus fibras, el crecimiento del árbol (un árbol cuyo crecimiento sea lento, presentará una madera más dura), la parte del tronco (la parte central presenta una mayor dureza) y la especie. A causa de ello, existen una gran variedad de ensayos de dureza, que se pueden agrupar en: por rayado, penetración y por rebote. Pero para analizar la dureza de las maderas siempre se recomienda hacerlo por penetración. Dentro del grupo de ensayo por penetración, existen diferentes modos de hacerlo dependiendo de la forma del cabezal de contacto, entre los que cabe destacar: Brinell, Rockwell, Vickers, Knoop, Janka, Monnin o Chalais Meudon.

En España, para medir la dureza en maderas se hace siguiendo la norma UNE 56.534 por el método Monnin o Chalais Meudon. Este método consiste en aplicar una carga de 1 kN por centímetro de anchura de la probeta, mediante un cilindro de acero de 30 mm de diámetro.



*Ilustración 21: Ensayo de la dureza de una madera por el método Monnin o Chalais Meudon.*

En cuanto a la tendencia a la curvatura, en los tres casos es grande. La madera es de tipo persistente.

En cuanto a las propiedades tecnológicas, entre las que se detalla: el serrado, clavado, atornillado, encolado y acabado. Las tres maderas presentan las mismas características. Presentan un muy buen comportamiento en cuanto al serrado y al encolado y un comportamiento peor en el clavado, atornillado y acabado.

Por último, en cuanto a las propiedades mecánicas (resistencia a la flexión (esfuerzo máximo que pueden soportar las fibras antes de llegar a romperse), resistencia a la compresión (capacidad que tiene un material de soportar una carga máxima antes de llegar a su límite de ruptura), resistencia a la tracción (capacidad máxima que soporta un material al estirarse antes de llegar a romperse) y módulo de elasticidad (constante elástica que se puede encontrar mediante el ensayo de tracción del material- Módulo de Young)): El Abeto Alemán es un material más resistente con un valor de resistencia a la flexión de 710 kg/cm<sup>2</sup>, 450 kg/cm<sup>2</sup> en la resistencia a la compresión, 650 kg/cm<sup>2</sup> en la resistencia a la tracción y un módulo de elasticidad de 110.000 kg/cm<sup>2</sup>, frente al Abeto Engelmann que es el material que presenta una menor resistencia, con unos valores de: 615 kg/cm<sup>2</sup> para la resistencia a la flexión, 390 kg/cm<sup>2</sup> en la resistencia a la

compresión, 563 kg/cm<sup>2</sup> en la resistencia a la tracción y un módulo de elasticidad de 95.000 kg/cm<sup>2</sup>.

Se debe de tener en cuenta que, a la hora de definir las propiedades mecánicas de las diferentes maderas, hay que distinguir claramente la dirección de sus fibras (paralelas o perpendiculares), este hecho provoca la principal diferencia en su comportamiento respecto a los materiales y que las normas que definen la metodología a seguir para realizar estos ensayos son: Las normas EN 384 y EN 408 del Comité CEN TC 124.

En cuanto a la familia del cedro, el cedro rojo presenta una mayor densidad (370 kg/m<sup>3</sup>) que el cedro amarillo (350 kg/m<sup>3</sup>), por tanto, la dureza del mismo también será mayor, 1'3 respecto a 1'2 del cedro amarillo. Está considerada una madera de tipo blando. La tendencia a curvarse en este caso es pequeña. Es una madera persistente.

Por otro lado, las propiedades tecnológicas del cedro presentan un comportamiento muy especial ya que presenta muy buen comportamiento tanto en el serrado, clavado, atornillado, encolado y en el acabado. A diferencia del abeto que únicamente presentaba un muy comportamiento en el serrado y el encolado.

Por último, las propiedades mecánicas son muy parecidas en ambas maderas. El cedro rojo presenta una mayor resistencia a la flexión, compresión y tracción y un mayor módulo elástico que el cedro amarillo.

El Mongoy es una madera con una densidad elevada (800 kg/m<sup>3</sup>), por tanto, es una madera pesada. Es una madera dura en comparación con los demás tipos de maderas analizados. La tendencia a curvarse es grande. Es una madera de tipo nerviosa.

Presenta un muy buen comportamiento en el encolado y el acabado respecto al serrado, clavado y atornillado.

Tiene una elevada resistencia a la flexión y la compresión y, sin embargo, su resistencia a la tracción es baja. Su módulo de elasticidad también es elevado.

La madera de tipo Sapelli es una madera de peso medio, ya que tiene una densidad de 680 kg/m<sup>3</sup>. Es una madera semi-dura (3'9) y tiene una baja tendencia a curvarse. Madera de tipo semi-nerviosa.

Tiene unas muy buenas propiedades tecnológicas en cuenta a clavado, atornillado, encolado y acabado y un poco peor en la de serrado.

Su resistencia a la flexión, tracción y módulo de elasticidad es elevada, mientras que su resistencia a la compresión es menor.

En general se podría decir que el Mongoy es la madera más dura y resistente en comparación con las demás. A esta le sigue la Sapelli. Pero estas maderas, debido a su dureza y resistencia se utilizan más para mástiles o recubrir laterales en guitarras. Es decir, se utilizan más para las partes de los instrumentos que influyan en menor medida con el sonido que vayan a emitir.

Debido a ello, este estudio se va a centrar en el Abeto y el Cedro, ya que son maderas menos duras y resistente, pero que psicoacústicamente presentan mejores resultados.

En segundo lugar, se procede a ensayar cada madera psicoacústicamente. Primero, se programa el generador de funciones, que será el equipo que va a generar las señales variables en función del tiempo. Los pasos a seguir en este caso serán los siguientes:

- En el selector de funciones se selecciona la opción de onda triangular. Esta será la forma que va a tener la onda de la señal de salida.
- Seguidamente se selecciona un rango o margen de frecuencia de trabajo de la señal de salida mediante los selectores de rango y mando de ajuste. En este caso el rango estará comprendido entre 1 y 10 Hz.
- En particular las condiciones de trabajo serán: 5 Hz, 4 V y 0'33 A.

Por otro lado, se deberá de ajustar la tarjeta de adquisición de datos, antes de empezar a ensayar los materiales, para adecuar la señal a niveles compatibles con el elemento que hace la transformación a señal digital.

Seguidamente, se posiciona el Shaker debajo del material y se ajustará su altura para que esté lo más cerca posible de la madera, pero sin llegar a tocarla. En la imagen siguiente se puede observar la manera adecuada de posicionarlo. De este modo se pretende evitar la deformación del material objeto de estudio y por consiguiente la invalidez del experimento.



*Ilustración 22: Posición Shaker respecto al material a estudiar*

Para ensayar todos los materiales con un mismo nodo vibratorio, se ha hecho una plantilla previamente con la cual se marcará el nodo en dirección paralela y el nodo en dirección perpendicular.

El Shaker vibra continuamente de modo que golpea el material para generar la señal analógica que posteriormente se va a procesar.

Mediante la conversión de la señal analógica a digital se va a obtener el fichero de audio correspondiente al sonido del material al aplicarle una vibración externa, una tabla con los datos de la FFT y una gráfica del espectrograma.

Este mismo proceso se va a utilizar para analizar todas las láminas de madera tanto en dirección paralela como en perpendicular.

Una vez obtenidos estos resultados se va a analizar la psicoacústica de estos materiales empleando un tubo de cartón y esferas de acero, de modo que las esferas impactan sobre el

material obteniendo el sonido de un único impacto. Al emplear este único impacto se consigue separar el sonido de un golpe y así se puede analizar su duración y frecuencia. Este sonido se analiza siguiendo el mismo proceso anteriormente nombrado.

A modo comparativo se va a repetir este proceso en todas las láminas de madera.

Una vez obtenidos todos estos resultados se crea una tabla con la que poder buscar un material que se adapte a estas características.

Después de una búsqueda exhaustiva, se encuentran varios tipos de madera que intentan sustituir a las maderas de alta calidad. En este proyecto se ha querido dar un paso más allá y ofrecer diferentes posibilidades con otros tipos de materiales como es el caso del cáñamo, yute y borra. Cabe destacar que se han escogido estos elementos debido a que son materiales multicapa, reciclables y ecológicos junto con una resina biodegradable.

A continuación, se procede a fabricar los nuevos materiales mediante el método de infusión por vacío.



*Ilustración 23: Montaje experimental fabricación de los nuevos materiales*

#### 4.1 INFUSIÓN POR VACÍO

La infusión por vacío (del inglés Vacuum infusion) es una técnica de fabricación de materiales compuestos poliméricos reforzados con fibra. El proceso consiste en la impregnación de una preforma de fibra seca con una resina termoestable de baja viscosidad (formada por resina y catalizador, para facilitar la reticulación del polímero) mediante una diferencia de presiones entre la cavidad de la preforma y el depósito de la resina, sellada con tejido pelable, una bolsa de vacío y masilla de cierre. La diferencia de presiones se realiza artificialmente mediante una bomba de vacío, que obliga a la resina a desplazarse por el interior de la cavidad de la preforma, logrando así un proceso gradual de impregnado de ésta.

Este proceso requiere un control sobre el tiempo de impregnación del tejido, no permitiendo que éste se haga demasiado rápido (creación de porosidad) ni demasiado lento (provocando un curado que impediría el avance de la resina en la preforma). Es por ello que la viscosidad del polímero limita la aplicación de este método de fabricación de materiales compuestos a polímeros termoestables de baja viscosidad.

Entre los beneficios que presenta respecto a técnicas de curado de compuestos laminados sin bomba de vacío, se encuentran:

- Una mejor relación fibra a resina
- Un laminado más resistente
- Un bajo contenido nulo
- Se reduce la exposición de operador a emisiones perjudiciales
- Se reduce el uso de resina debido a tela precompactada
- Laminación más rápida de la tela

Una vez fabricados, se estudian psicoacústicamente utilizando el mismo montaje experimental y condiciones experimentales que con las maderas. De esta manera se puede realizar una comparativa y obtener que material se acerca más a las características de las maderas de alta calidad para la fabricación de instrumentos musicales.

## 5. RESULTADOS

## 5 RESULTADOS

### 5.1 RESULTADOS ENCUESTA

En primer lugar, se ha realizado una encuesta a 5 personas, para determinar la sensación de agrado que provocan los sonidos de las maderas y los nuevos materiales en las personas. Es decir, se pide que se identifique que madera y que nuevo material tiene un sonido más agradable. Por otro lado, se pide que se identifique que sonido de los nuevos materiales es el que se parece más al de una madera y, por último, emparejar cada sonido de los nuevos materiales con el que se parezca más a los de la madera.

Los resultados que se han obtenido son los siguientes:

#### ¿Cuál de estos sonidos te parece más agradable? (maderas) (5 respuestas)

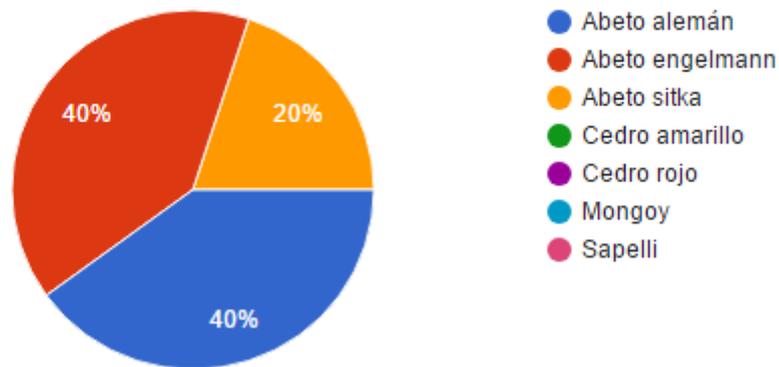


Gráfico 1: Respuestas encuesta a que sonido de las maderas es más agradable

Se ha obtenido un 40% en abeto engelmann y abeto alemán y un 20% en abeto sitka, por tanto, la familia del abeto es el que produce un sonido más agradable.

#### ¿Cuál de estos sonidos te parece más agradable? (nuevos materiales) (5 respuestas)

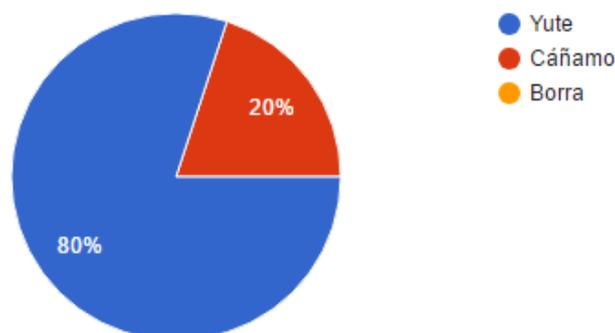


Gráfico 2: Respuestas encuesta a que sonido de los nuevos materiales es más agradable

En el caso de los nuevos materiales, el 80% de las personas han considerado que el yute presenta un sonido más agradable respecto al cáñamo y la borra.

## ¿Qué sonido de los anteriores mostrados crees que se parece más al sonido de una madera?

(5 respuestas)

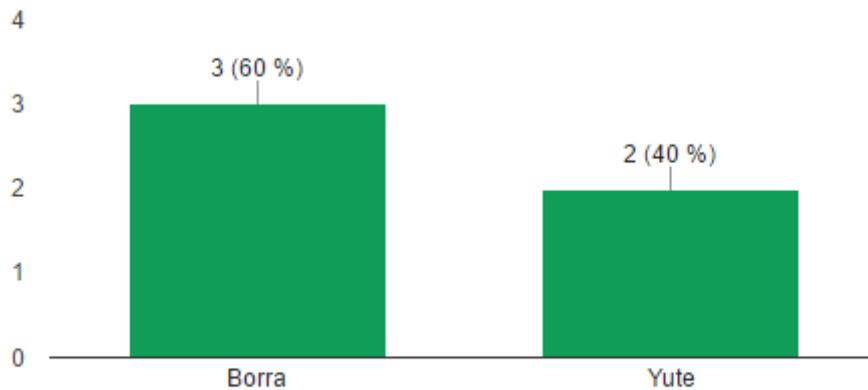


Gráfico 3: Sonido que se parece más al de una madera

La borra parece ser el material que tiene un sonido más parecido al de la madera con un 60% respecto al 40% del yute.

## ¿Podrías emparejar cada sonido de los nuevos materiales que te he mostrado con el de una madera?

(5 respuestas)

Yute -> cedro rojo Borra -> cedro amarillo Cañamo -> a ninguna
Yute -> cedro rojo Borra -> cedro amarillo Cañamo -> a ninguna
Yute -> cedro rojo Borra -> abeto sitka Cañamo -> a ninguna
Yute -> cedro rojo Borra -> abeto sitka Cañamo -> a ninguna
Yute -> cedro amarillo Borra -> cedro rojo Cañamo -> a ninguna

Tabla 6: Sonidos semejantes

Según los resultados de las encuestas, el yute presenta un sonido muy parecido al del cedro rojo, sin embargo, en el caso de la borra hay dualidad entre el cedro amarillo y el abeto sitka. El cáñamo es el único material que en cuanto a parecido con el de una madera no presenta ninguna coincidencia.

## 5.2 REPRESENTACIÓN FFT MEDIA VS FRECUENCIA (HZ)

Seguidamente se van a mostrar las diferentes gráficas de FFT, calculadas como la media entre la FFT paralela y la perpendicular, respecto a la frecuencia (Hz). Se va a escoger un rango de muestreo desde 20 Hz a 4200 Hz, que se corresponde con el rango de frecuencias que utiliza un piano de cola. Se utiliza ese rango porque estamos en el campo de la percepción del sonido. El piano es uno de los instrumentos que presenta más octavas (de 27'5 a 4186), por lo tanto es una buena referencia a seguir.

Para poder comparar mejor los resultados, se ha realizado un gráfico comparativo con todas las FFT medias de las maderas utilizadas respecto a la frecuencia(Hz) y otro con las FFT media-Frecuencia(Hz) de los nuevos materiales.

### 5.2.1 RESULTADOS FFT MEDIA – FRECUENCIA (HZ) PARA LAS MADERAS

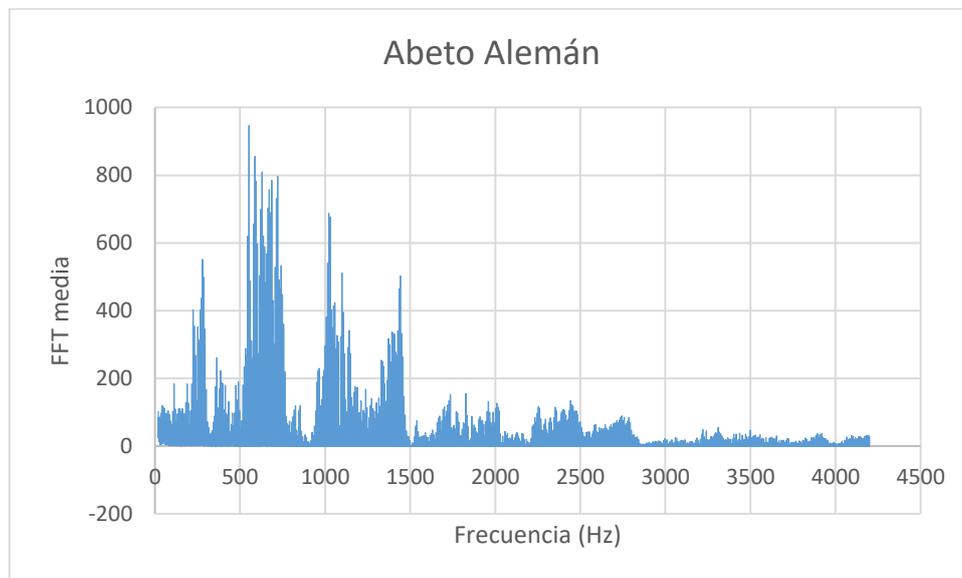


Gráfico 4: Abeto alemán FFT media- Frecuencia (Hz)

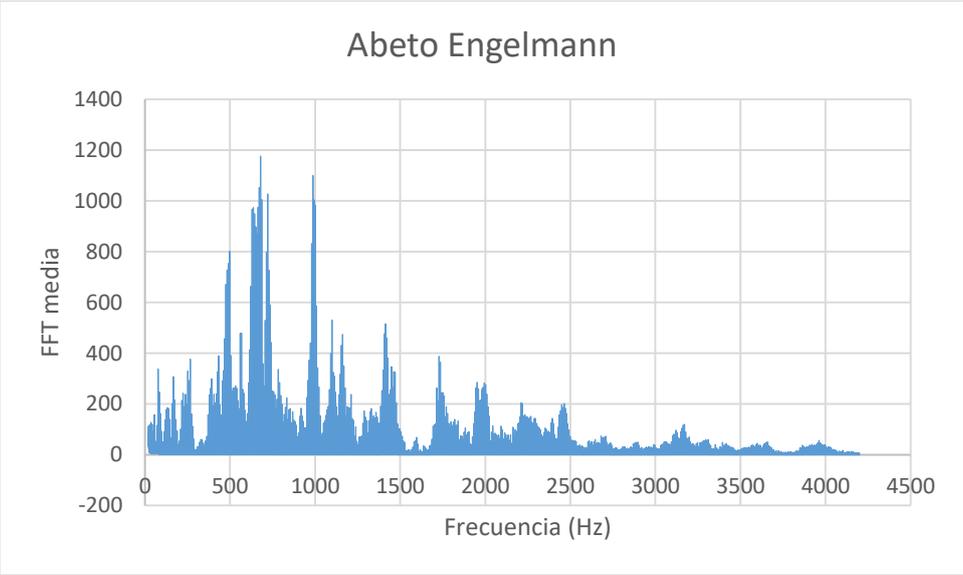


Gráfico 5: Abeto engelmann FFT media-Frecuencia (Hz)

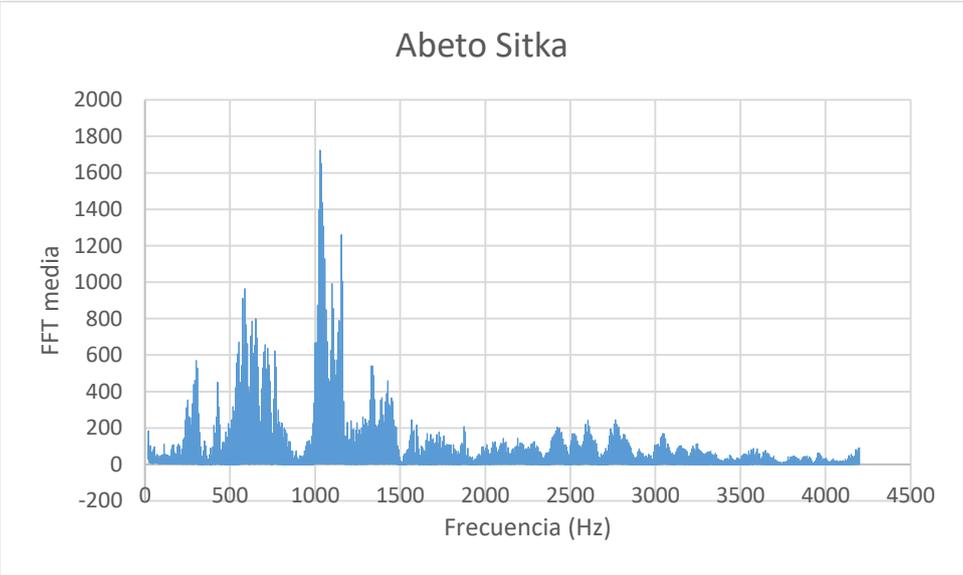


Gráfico 6: Abeto sitka FFT media-Frecuencia (Hz)

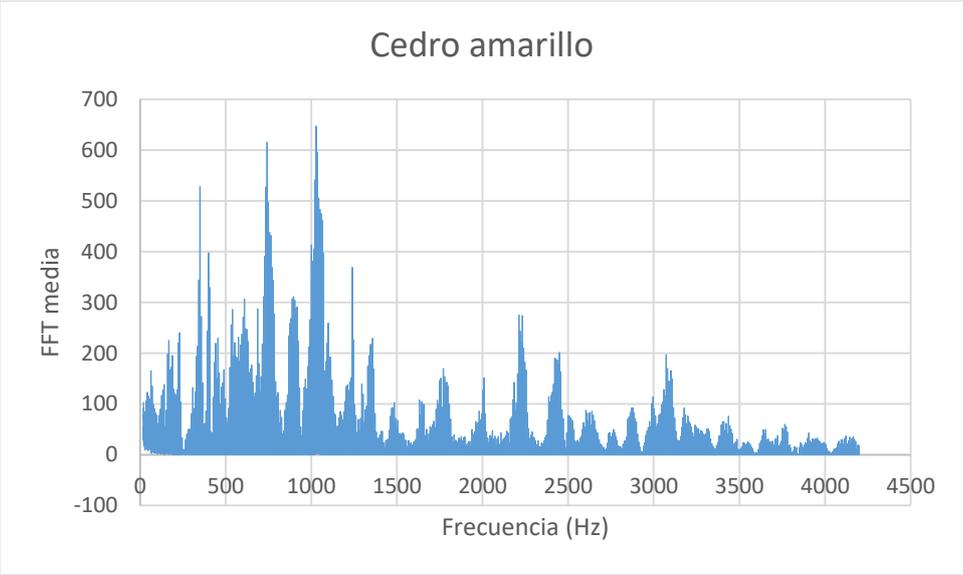


Gráfico 7: Cedro amarillo FFT media-Frecuencia (Hz)

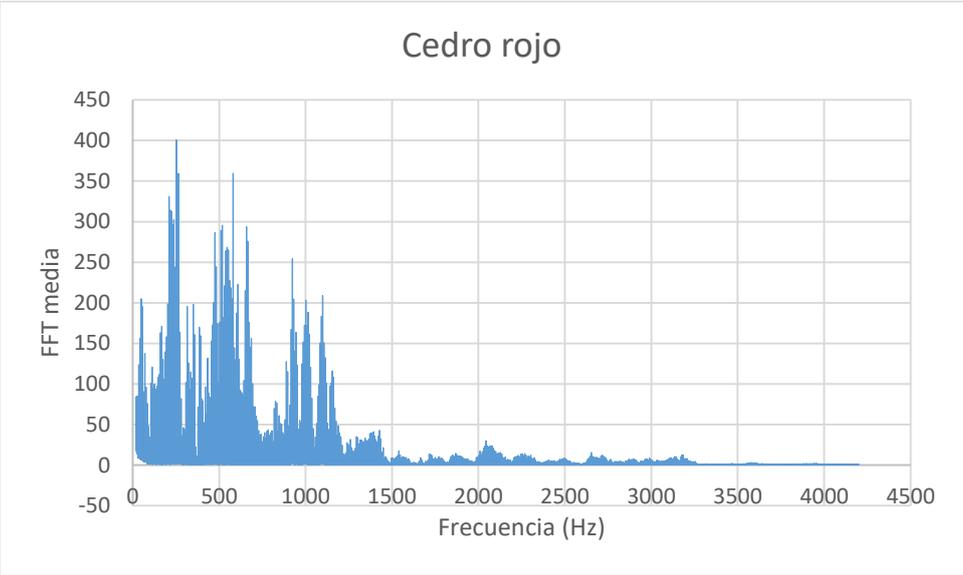


Gráfico 8: Cedro rojo FFT media-Frecuencia (Hz)

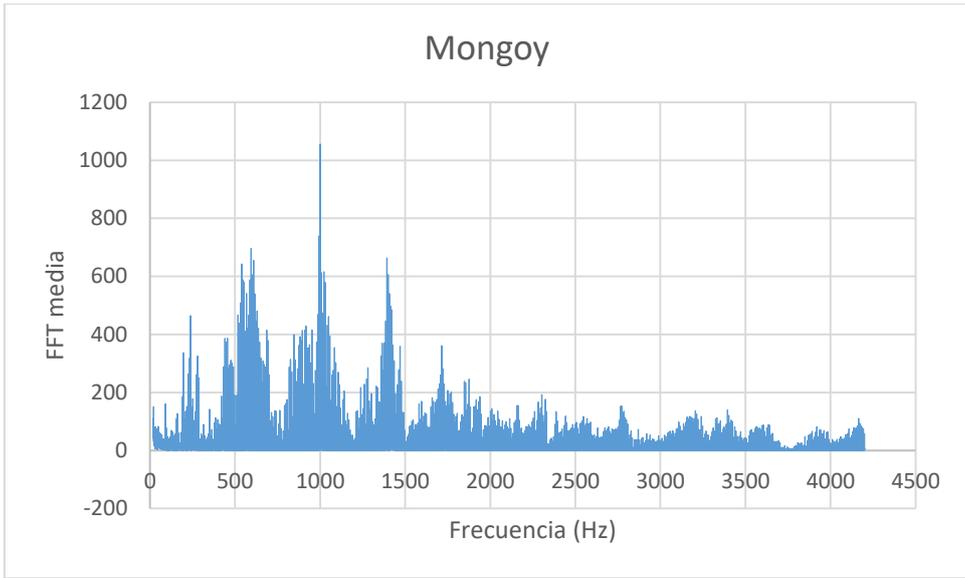


Gráfico 9: Mongoy FFT media-Frecuencia (Hz)

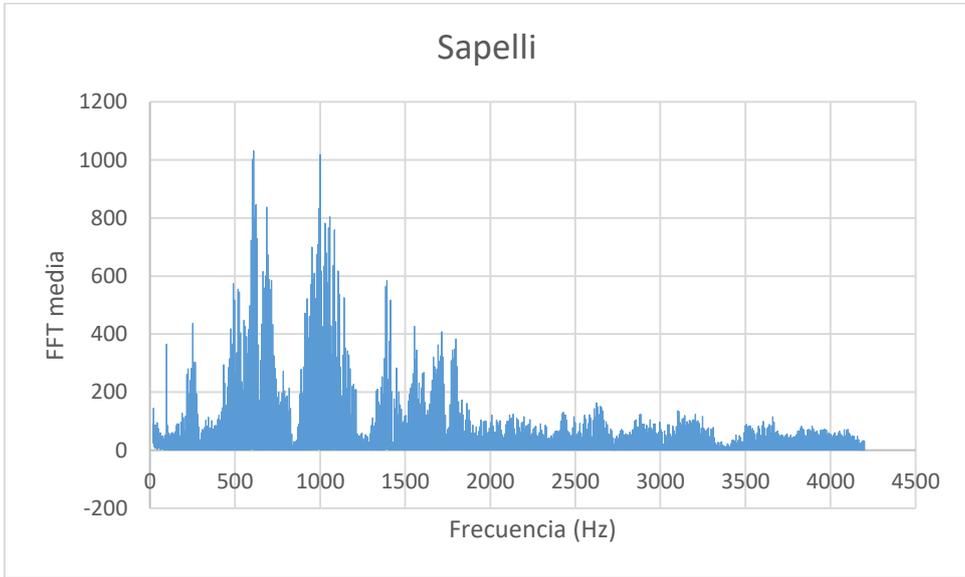


Gráfico 10: Sapelli FFT media-Frecuencia(Hz)

## 5.2.2 GRÁFICA COMPARATIVA FFT MEDIA-FRECUENCIA (HZ) MADERAS

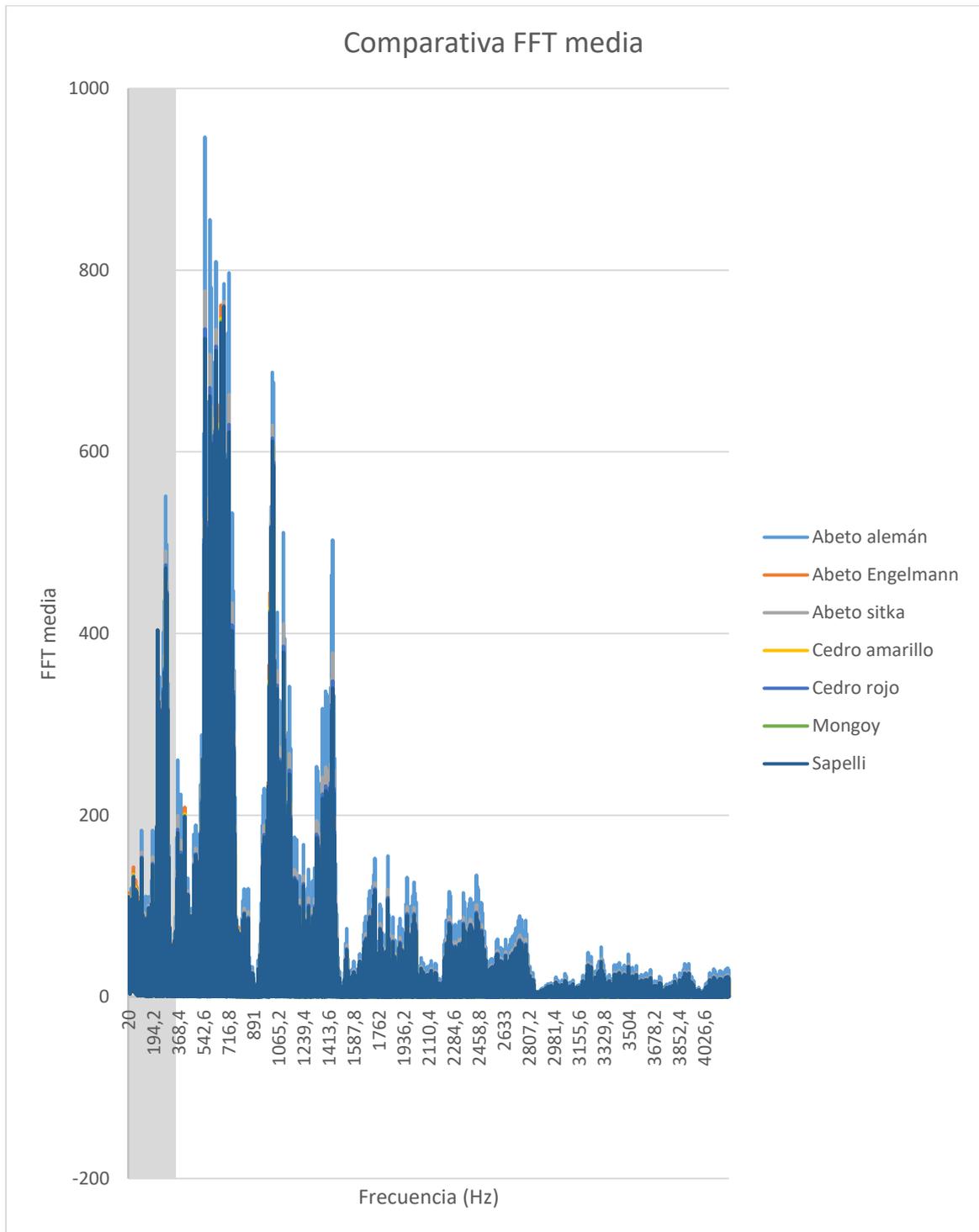


Gráfico 11: Comparativa FFT media-Frecuencia(Hz) de todas las maderas

### 5.2.3 RESULTADOS FFT MEDIA – FRECUENCIA (HZ) PARA LOS NUEVOS MATERIALES

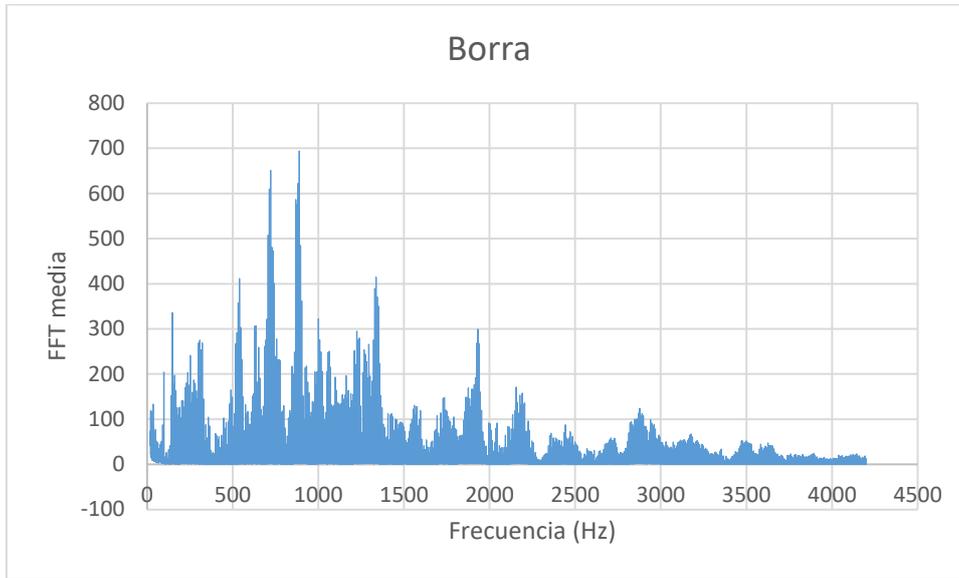


Gráfico 12: Borra FFT media-Frecuencia(Hz)

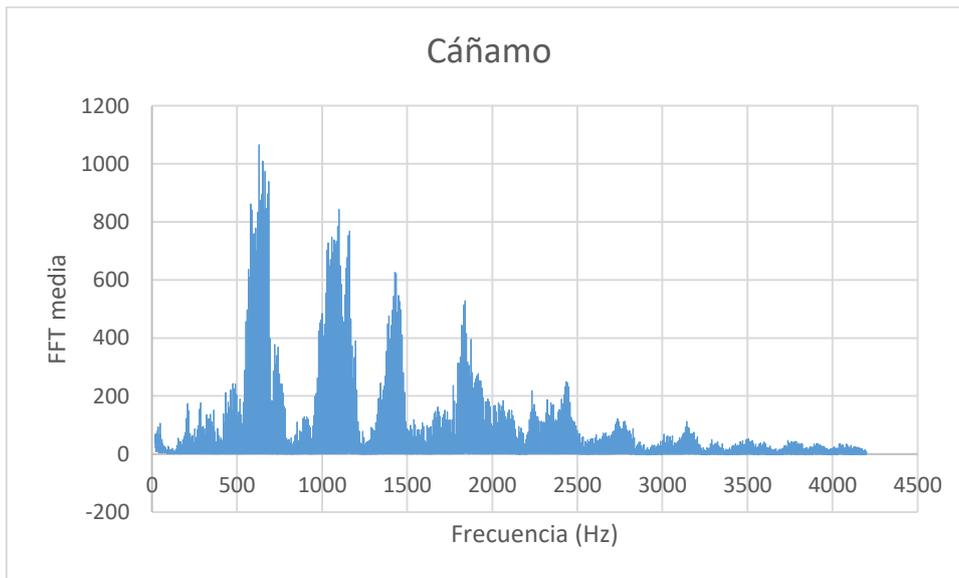


Gráfico 13: Cáñamo FFT media-Frecuencia(Hz)

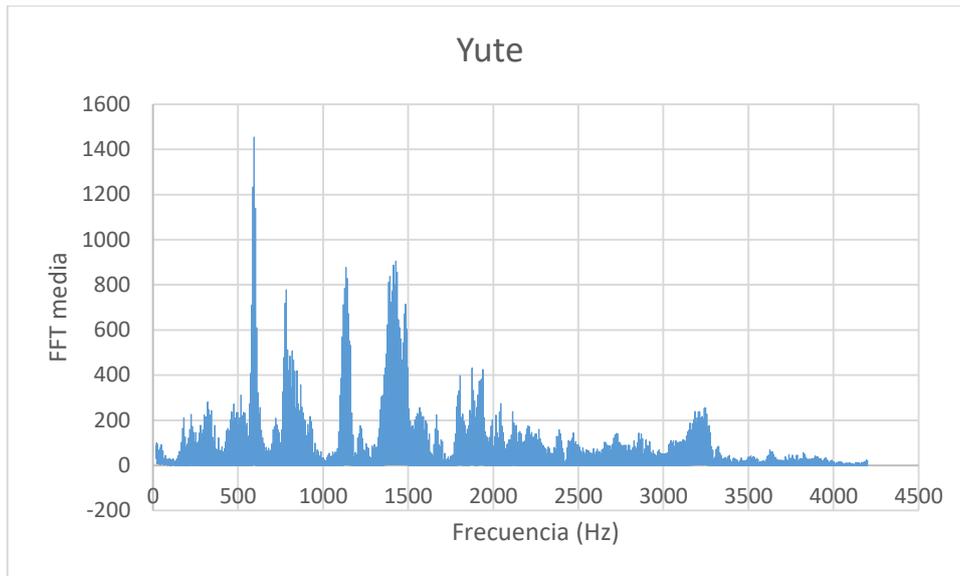


Gráfico 14: Yute FFT media-Frecuencia(Hz)

#### 5.2.4 GRÁFICA COMPARATIVA FFT MEDIA-FRECUENCIA (HZ) MADERAS

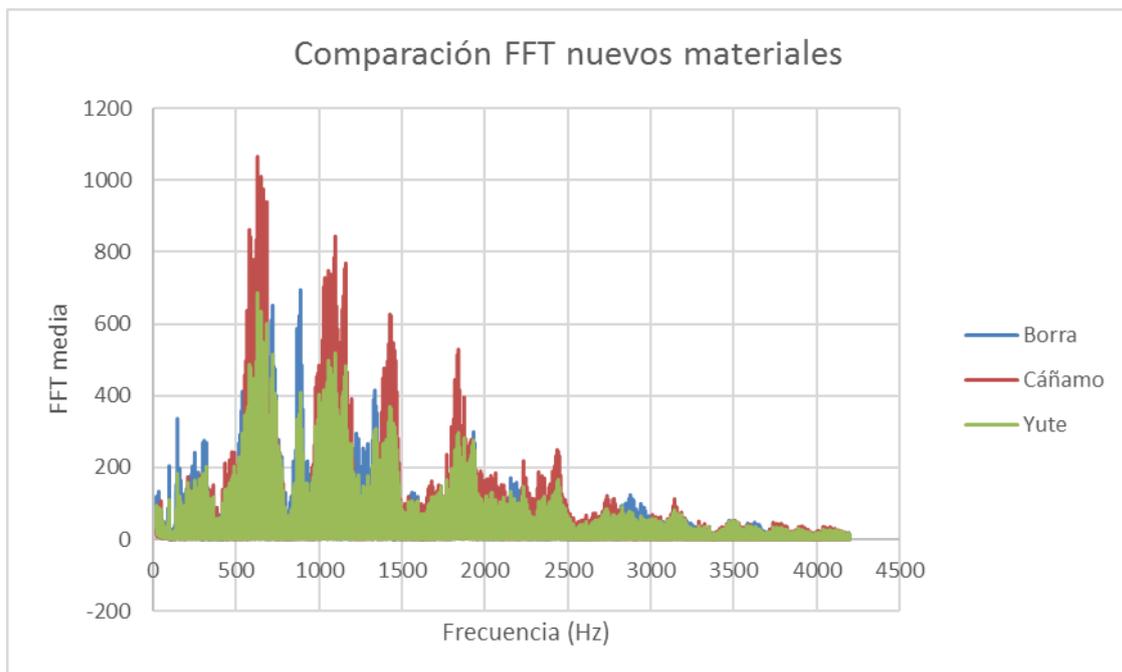


Gráfico 15: Comparación FFT media-Frecuencia (Hz) nuevos materiales

### 5.3 CRITERIOS PSICOACÚSTICOS DE LAS MADERAS

Por otro lado, se han obtenido los criterios psicoacústicos, tanto de las maderas como de los nuevos materiales, donde se van a reflejar: la sonoridad, la agudeza, la tonalidad, la aspereza y la sensación de agrado (dicho parámetro se podrá comparar con los resultados que se han obtenido con las encuestas).

En las maderas, se pueden observar cuatro tipos de columnas, numeradas en orden ascendente. Estas columnas hacen referencia a la dirección de la madera (paralela o perpendicular) y el tipo de bola de acero que se ha utilizado para el impacto (10mm o 17mm). Dependiendo del tipo de bola y dirección, se puede ver que los resultados varían.

<b>Abeto Alemán</b>	36 (FD)	35 (FD)	34 (FD)	33 (FD)	Unidades	Media
Sonoridad	36,19	37,3	36,36	36,64	sone	36,6225
Agudeza	1,45	1,37	1,42	1,22	acum	1,365
Tonalidad	0,92	0,29	0,51	0,65	tu	0,5925
Aspereza	1,1	1,01	1,19	1,16	asper	1,115
Sensación agrado sonoro	0,21	0,15	0,17	0,23	pu	0,19

Tabla 7: Criterios psicoacústicos abeto alemán

<b>Abeto Engelmann</b>	37 (FD)	38 (FD)	39 (FD)	40 (FD)	Unidades	Media
Sonoridad	39,92	35,64	37,1	36,41	sone	37,2675
Agudeza	1,28	1,34	1,16	1,37	acum	1,2875
Tonalidad	0,5	0,78	0,61	0,85	tu	0,685
Aspereza	1,01	1,04	1,2	1,23	asper	1,12
Sensación agrado sonoro	0,19	0,24	0,23	0,2	pu	0,215

Tabla 8: Criterios psicoacústicos abeto engelmann

<b>Abeto Sitka</b>	41 (FD)	42 (FD)	44 (FD)	45 (FD)	Unidades	Media
Sonoridad	36,86	34,42	26,92	36,46	sone	33,665
Agudeza	1,32	1,28	1,14	1,37	acum	1,2775
Tonalidad	0,68	0,71	0,55	0,73	tu	0,6675
Aspereza	1,19	0,91	1,12	0,82	asper	1,01
Sensación agrado sonoro	0,2	0,29	0,34	0,26	pu	0,2725

Tabla 9: Criterios psicoacústicos abeto sitka

<b>Cedro amarillo</b>	46 (FD)	47 (FD)	48 (FD)	49 (FD)	Unidades	Media
Sonoridad	37,52	34,54	26,62	35,37	sone	33,5125
Agudeza	1,37	1,29	1,23	1,38	acum	1,3175
Tonalidad	0,87	0,83	0,69	0,71	tu	0,775
Aspereza	1,18	1,2	1,15	1,2	asper	1,1825
Sensación agrado sonoro	0,2	0,24	0,33	0,2	pu	0,2425

Tabla 10: Criterios psicoacústicos cedro amarillo

<b>Cedro rojo</b>	50 (FD)	51 (FD)	52 (FD)	53 (FD)	Unidades	Media
Sonoridad	37,75	35,11	29,62	31,8	sone	33,57
Agudeza	1,36	1,27	1,19	1,23	acum	1,2625
Tonalidad	0,61	0,48	0,71	0,79	tu	0,6475
Aspereza	1,18	1,28	1,09	1,22	asper	1,1925
Sensación agrado sonoro	0,18	0,19	0,33	0,27	pu	0,2425

Tabla 11: Criterios psicoacústicos cedro rojo

<b>Mongoy</b>	54 (FD)	55 (FD)	56 (FD)	57 (FD)	Unidades	Media
Sonoridad	41,08	39,9	35,28	36,54	sone	38,2
Agudeza	1,37	1,4	1,35	1,49	acum	1,4025
Tonalidad	0,57	0,22	0,43	0,33	tu	0,3875
Aspereza	1,23	1,1	1,11	1,12	asper	1,14
Sensación agrado sonoro	0,15	0,11	0,19	0,14	pu	0,1475

Tabla 12: Criterios psicoacústicos mongoy

<b>Sapelli</b>	68 (FD)	58 (FD)	59 (FD)	60 (FD)	Unidades	Media
Sonoridad	36,43	37,75	31,72	29,8	sone	37,09
Agudeza	1,44	1,39	1,23	1,3	acum	1,415
Tonalidad	1,02	0,49	0,68	0,25	tu	0,755
Aspereza	1,08	1,34	0,99	1,1	asper	1,21
Sensación agrado sonoro	0,22	0,15	0,31	0,19	pu	0,185

Tabla 13: Criterios psicoacústicos sapelli

## 5.4 CRITERIOS PSICOACÚSTICOS DE LOS NUEVOS MATERIALES

Del mismo modo, se calculan los criterios psicoacústicos para los nuevos materiales, mediante el programa: 01DB (Software específico para el análisis acústico). En este caso, como se puede observar, únicamente aparecen dos columnas. Esto es debido a que los nuevos materiales solo presentan una dirección, es decir, son unidireccionales.

<b>Cañamo</b>	63 (FD)	64 (FD)	Unidades	Media
Sonoridad	36,09	33,44	sone	34,765
Agudeza	1,61	1,83	acum	1,72
Tonalidad	0,29	0,21	tu	0,25
Aspereza	1,57	1,48	asper	1,525
Sensación agrado sonoro	0,08	0,07	pu	0,075

Tabla 14: Criterios psicoacústicos cañamo

<b>Borra</b>	65 (FD)	66 (FD)	Unidades	Media
Sonoridad	33,1	25,93	sone	29,515
Agudeza	1,41	1,41	acum	1,41
Tonalidad	0,64	0,59	tu	0,615
Aspereza	1,39	1,51	asper	1,45
Sensación agrado sonoro	0,18	0,2	pu	0,19

Tabla 15: Criterios psicoacústicos borra

<b>Yute</b>	61 (FD)	62 (FD)	Unidades	Media
Sonoridad	36,77	34,21	sone	35,49
Agudeza	1,53	1,65	acum	1,59
Tonalidad	0,6	0,41	tu	0,505
Aspereza	1,09	1,14	asper	1,115
Sensación agrado sonoro	0,17	0,14	pu	0,155

Tabla 16: Criterios psicoacústicos yute

## 5.5 ESPECTROGRAMAS MADERAS

En tercer lugar, se han obtenido los espectrogramas de las maderas y los nuevos materiales, tras realizar el experimento de hacer impactar una bola de acero sobre cada material. La señal que se obtiene se puede convertir en espectrograma mediante el programa Audacity. En el apartado de análisis de los resultados obtenidos, se compararán los resultados, con el fin de averiguar qué nuevo material se parece más a los resultados obtenidos con las maderas.

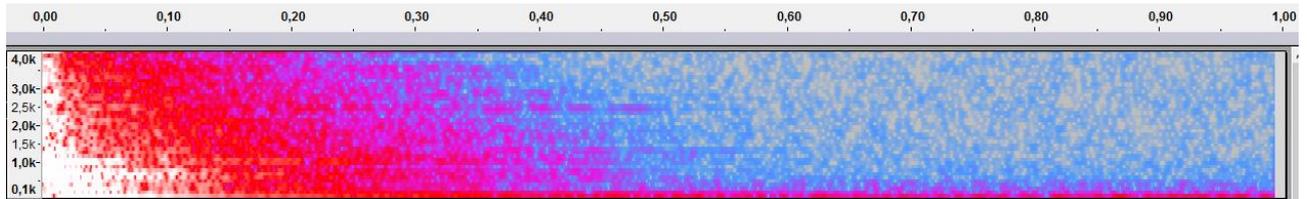


Gráfico 16: Espectrograma abeto alemán b10 par

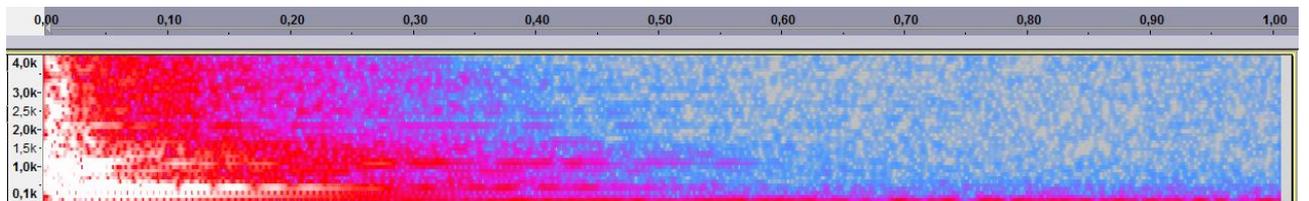


Gráfico 17: Espectrograma abeto alemán b10 per

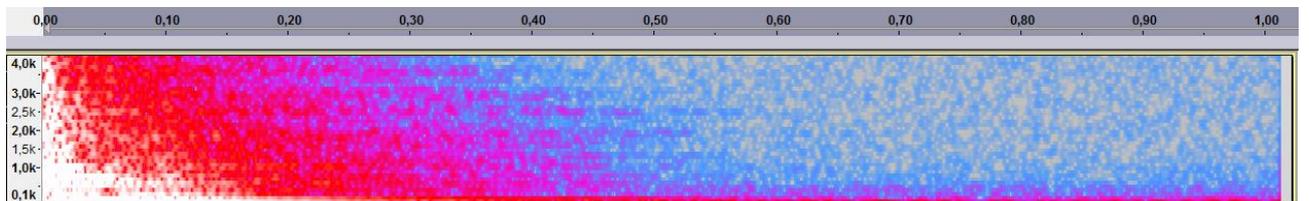


Gráfico 18: Espectrograma abeto alemán b17 par

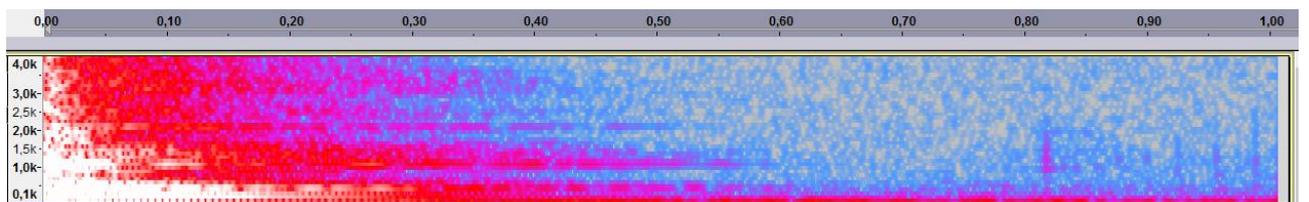


Gráfico 19: Espectrograma abeto alemán b17 per

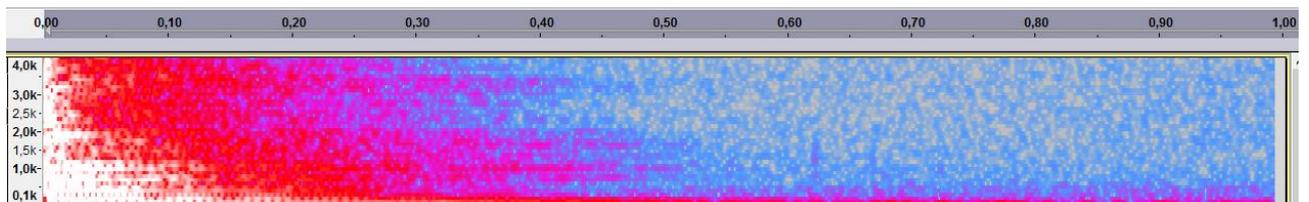


Gráfico 20: Espectrograma abeto engelmann b10 par

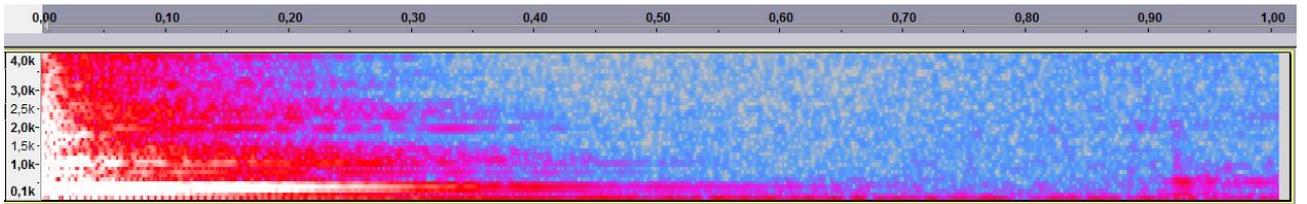


Gráfico 21: Espectrograma abeto engelmann b10 par

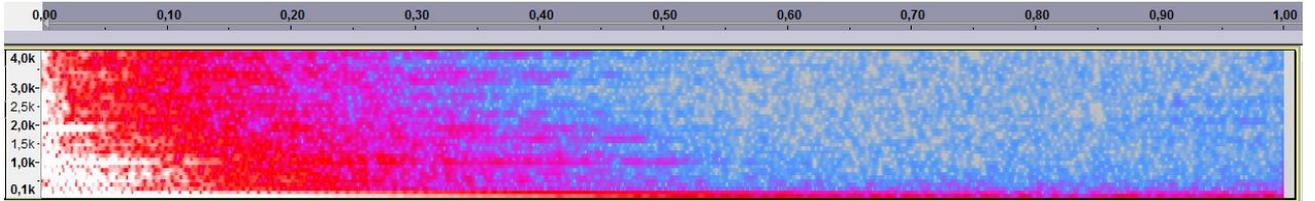


Gráfico 22: Espectrograma abeto engelmann b17 par

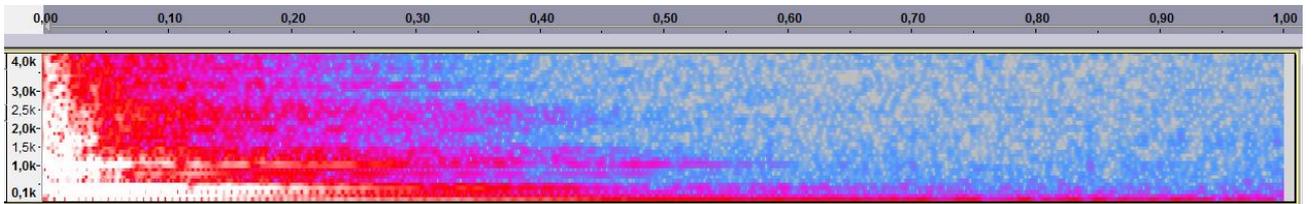


Gráfico 23: Espectrograma abeto engelmann b17 per

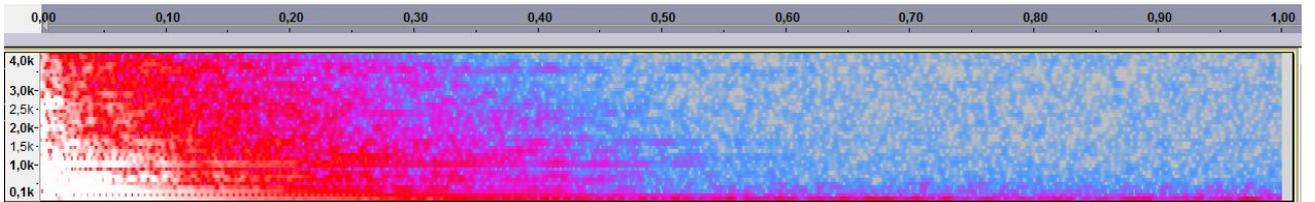


Gráfico 24: Espectrograma abeto sitka b10 par

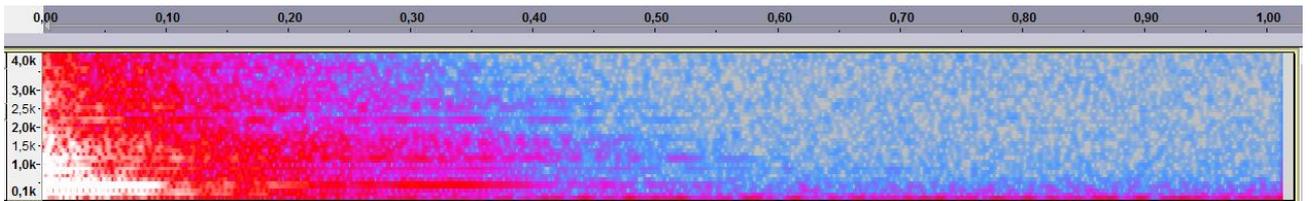


Gráfico 25: Espectrograma abeto sitka b10 per

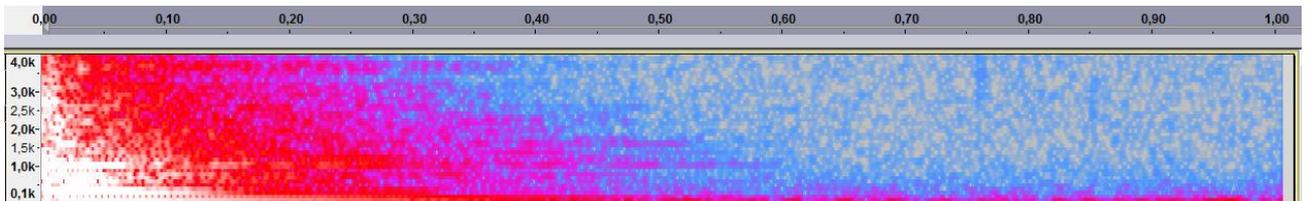


Gráfico 26: Espectrograma abeto sitka b17 par

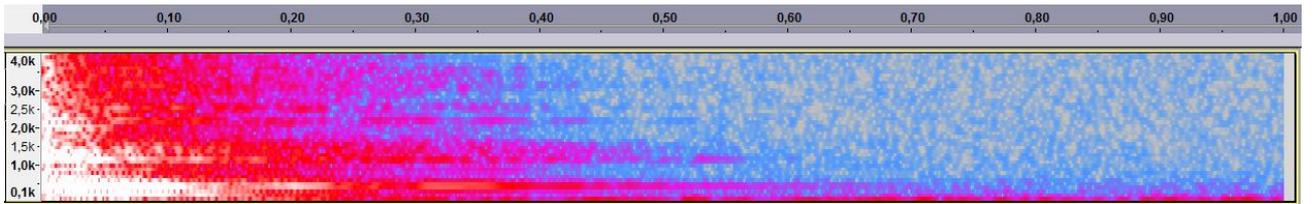


Gráfico 27: Espectrograma abeto sitka b17 per

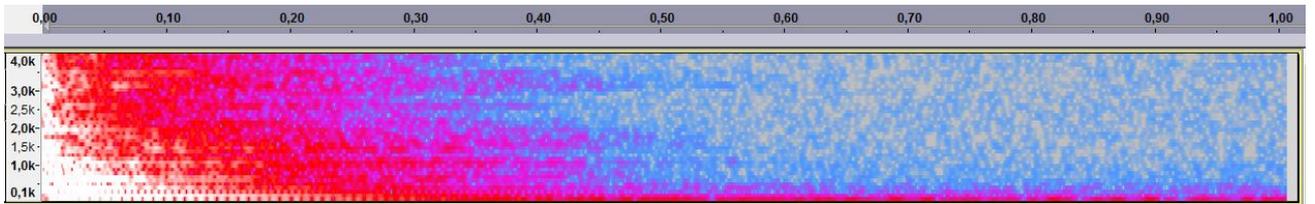


Gráfico 28: Espectrograma cedro amarillo b10 par

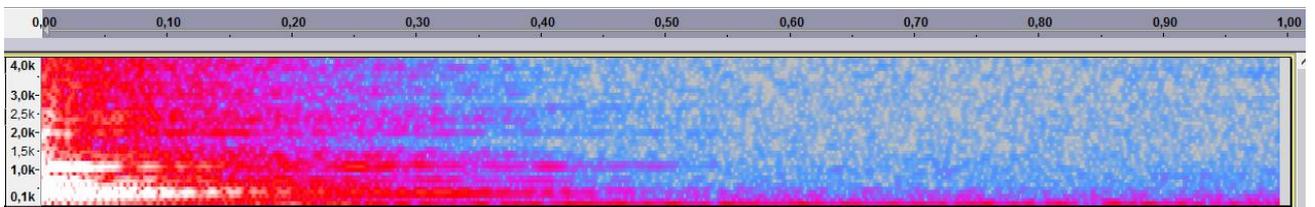


Gráfico 29: Espectrograma cedro amarillo b10 per

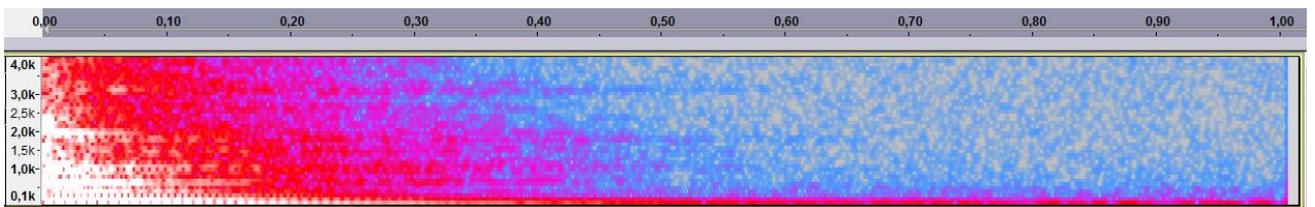


Gráfico 30: Espectrograma cedro amarillo b17 par

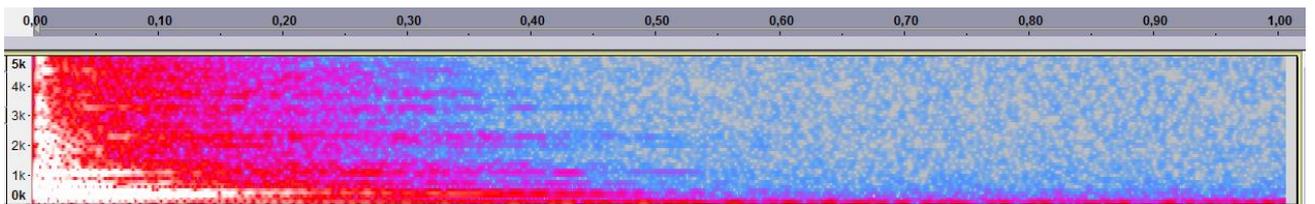


Gráfico 31: Espectrograma cedro amarillo b17 per

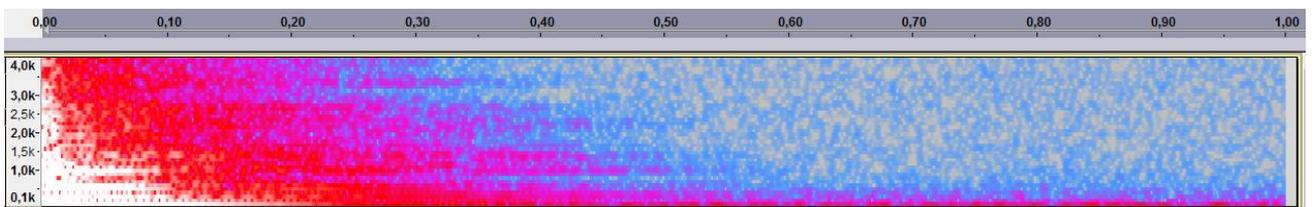


Gráfico 32: Espectrograma cedro rojo b10 par

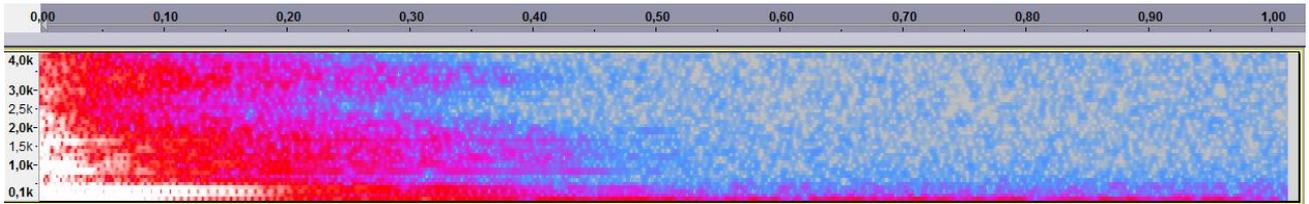


Gráfico 33: Espectrograma cedro rojo b10 per

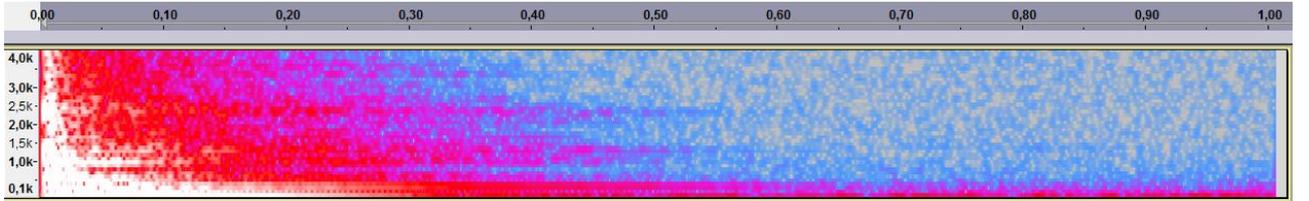


Gráfico 34: Espectrograma cedro rojo b17 par

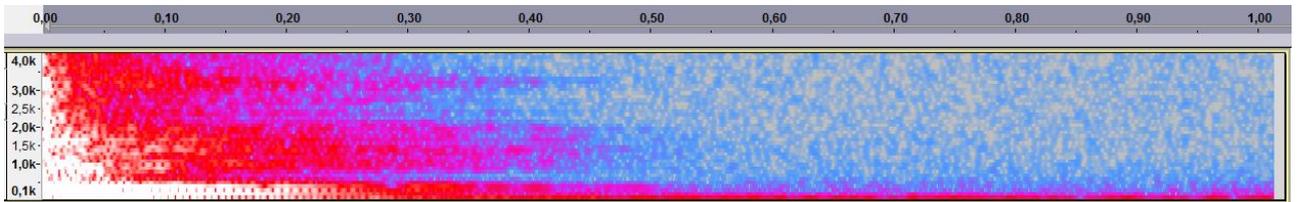


Gráfico 35: Espectrograma cedro rojo b17 per

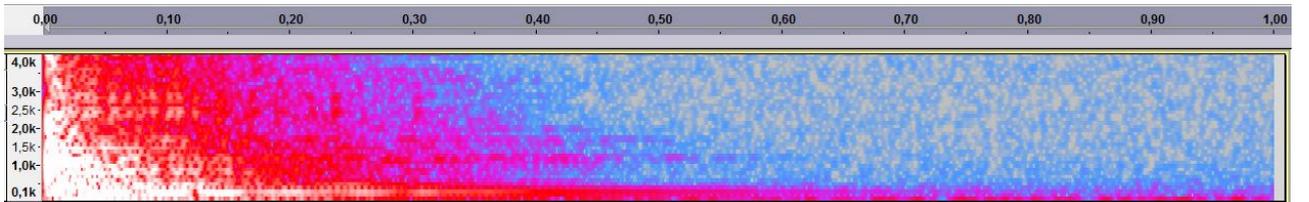


Gráfico 36: Espectrograma mongoy b10 par

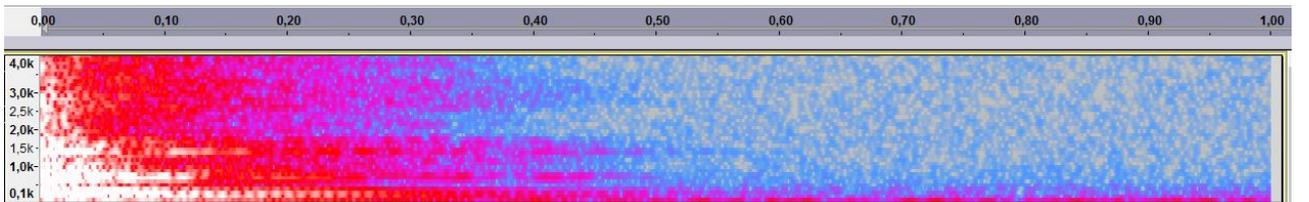


Gráfico 37: Espectrograma mongoy b10 per

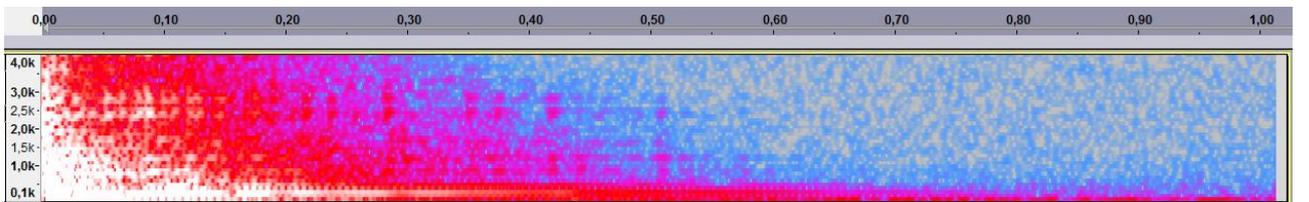


Gráfico 38: Espectrograma mongoy b17 par

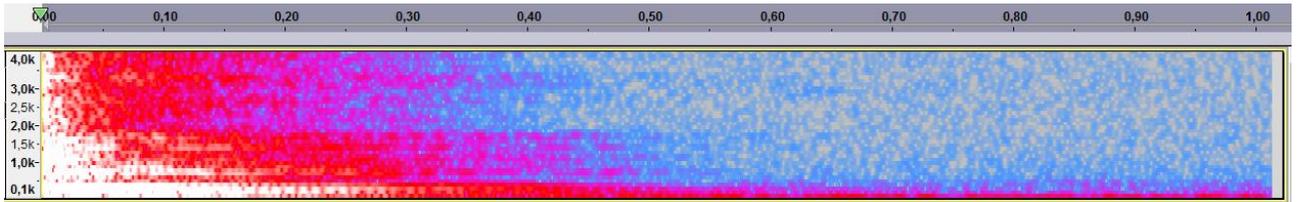


Gráfico 39: Espectrograma mongoy b17 per

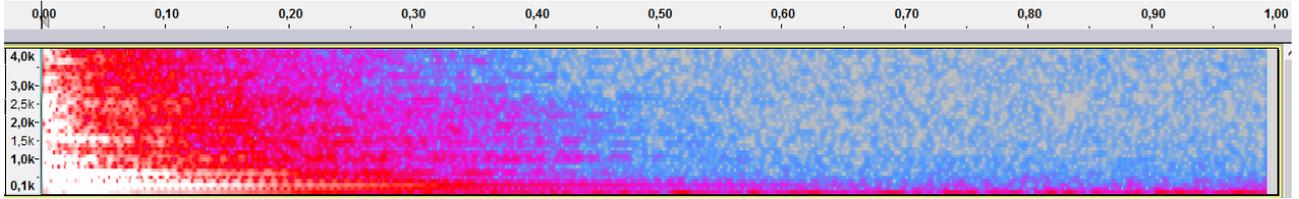


Gráfico 40: Espectrograma sapelli b10 par

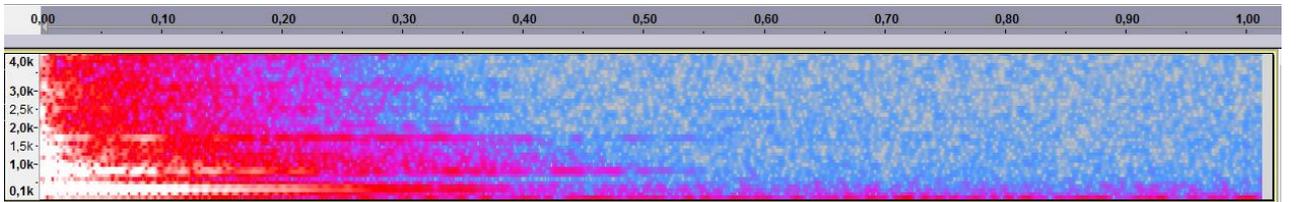


Gráfico 41: Espectrograma sapelli b10 per

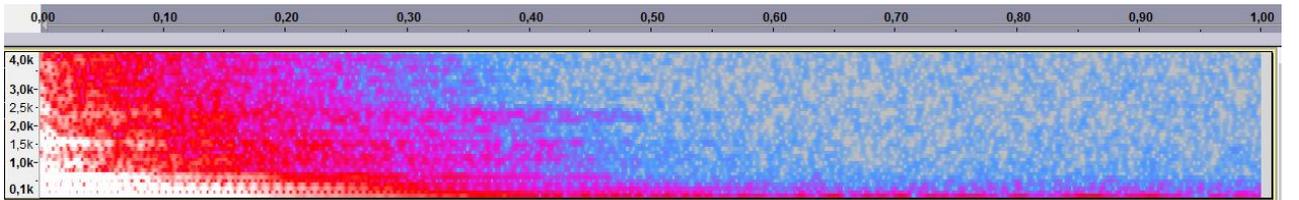


Gráfico 42: Espectrograma sapelli b17 par

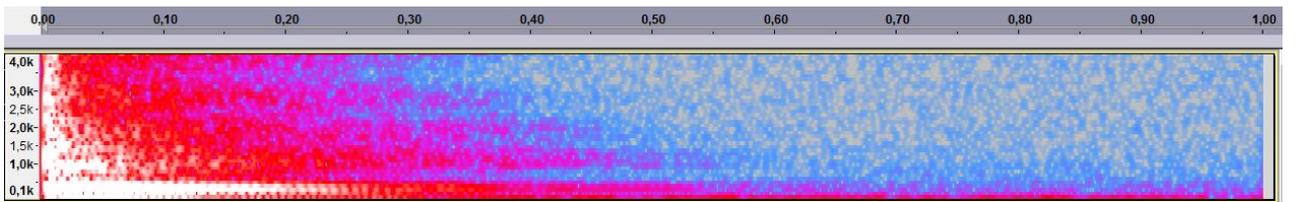


Gráfico 43: Espectrograma sapelli b17 per

## 5.6 ESPECTROGRAMAS NUEVOS MATERIALES

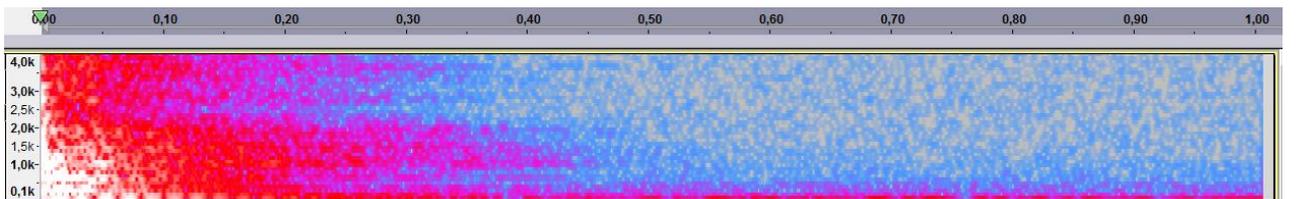


Gráfico 44: Espectrograma borra b10

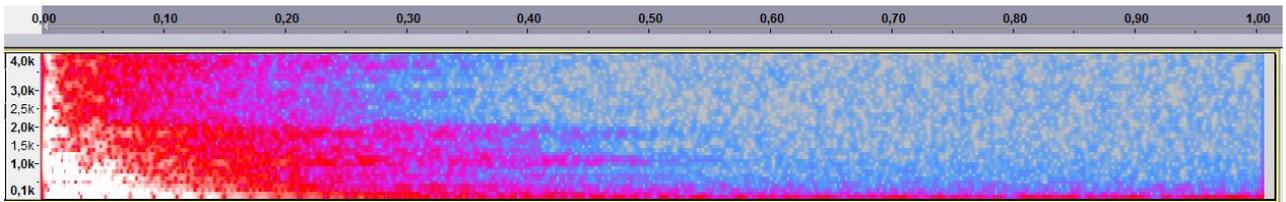


Gráfico 45: Espectrograma borra b17

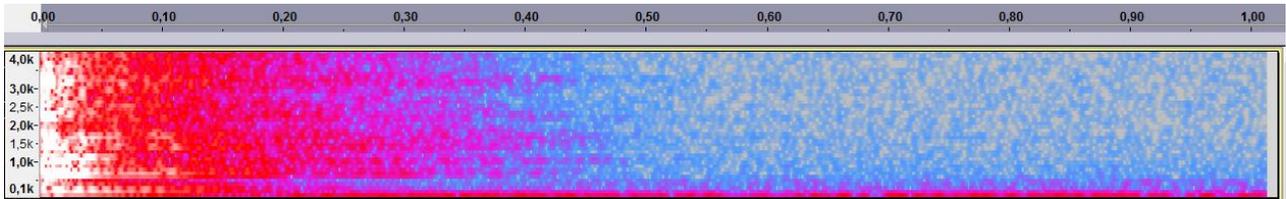


Gráfico 46: Espectrograma cáñamo b10

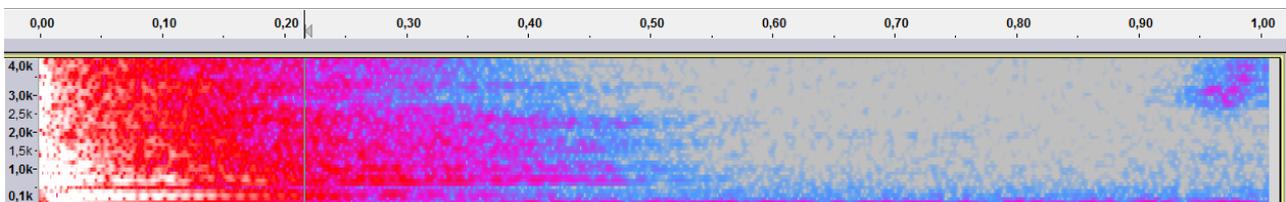


Gráfico 47: Espectrograma cáñamo b17

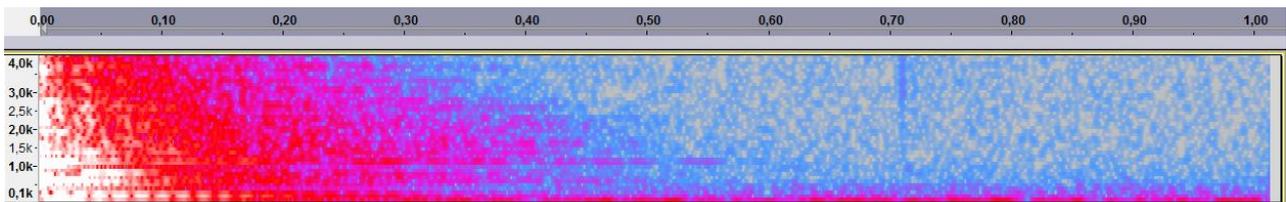


Gráfico 48: Espectrograma yute b10

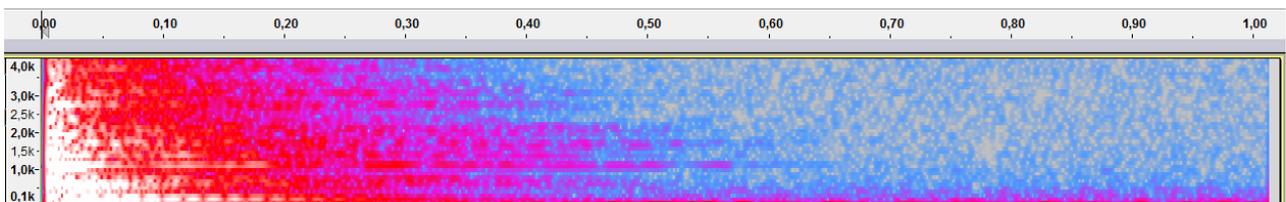


Gráfico 49: Espectrograma yute b17

## 5.7 TABLA MULTICRITERIO

La tabla multicriterio se ha obtenido de la tabla de criterios psicoacústicos de cada material. En primer lugar, se ha sumado cada fila, obteniendo un único resultado de sonoridad, agudeza, tonalidad y aspereza para todos los materiales.

Tras esta suma se observa que la variable sonoridad muestra un valor mucho más elevado que el resto de variables. Con la tabla multicriterio se va a igualar la importancia de todas las variables y de esta manera se va a poder hacer un análisis comparativo de los resultados.

Para darles la misma importancia a todas las variables, lo que se hace es dividir el valor de la suma de todas las sonoridades respecto al valor de la suma de todos los datos de aguza. Se va a repetir este procedimiento para todas las filas. Teniendo en cuenta que siempre se va a escoger el valor más grande que en este caso es el de la sonoridad.

Seguidamente se multiplicará cada valor de la tabla de criterios psicoacústicos por el valor obtenido previamente tras dividir la suma de las sonoridades respecto a la suma de las agudezas, tonalidades y asperezas, respectivamente.

Al sumar cada fila de nuevo, se puede comprobar que se obtiene un mismo resultado, por tanto, el procedimiento se ha seguido correctamente.

En último lugar, se van a asignar porcentajes a cada variable dependiendo de lo importantes que sean para escoger un material u otro para la fabricación de instrumentos musicales. A la tonalidad se le dará un 40% en importancia, a la agudeza un 30%, a la sonoridad un 20% y a la aspereza un 10%.

Se deberán de multiplicar cada valor por su correspondiente porcentaje, obteniendo los resultados mostrados en la siguiente tabla:

<b>Criterios psicoacústicos</b>	<b>Abeto alemán</b>	<b>Abeto engelmann</b>	<b>Abeto sitka</b>	<b>Cedro amarillo</b>	<b>Cedro rojo</b>	<b>Mongoy</b>	<b>Sapelli</b>	<b>Cáñamo</b>	<b>Borra</b>	<b>Yute</b>
Sonoridad	7,32	7,45	6,73	6,70	6,71	7,64	7,42	6,95	5,90	7,10
Agudeza	10,19	9,62	9,54	9,84	9,43	10,47	10,57	12,85	10,53	11,87
Tonalidad	14,09	16,30	15,88	18,44	15,40	9,22	17,96	5,95	14,63	12,01
Aspereza	3,23	3,25	2,93	3,43	3,46	3,31	3,51	4,42	4,20	3,23

Tabla 17: Tabla multicriterio

## 6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

## 6 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

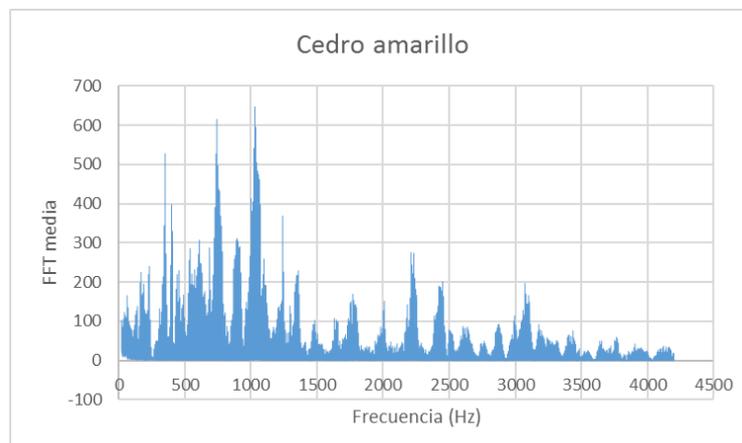
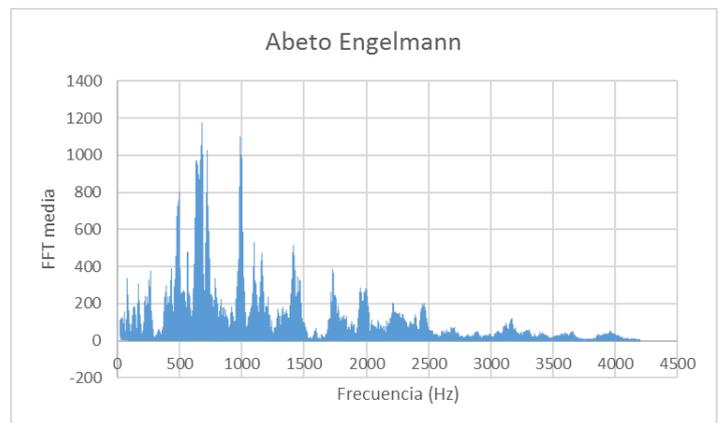
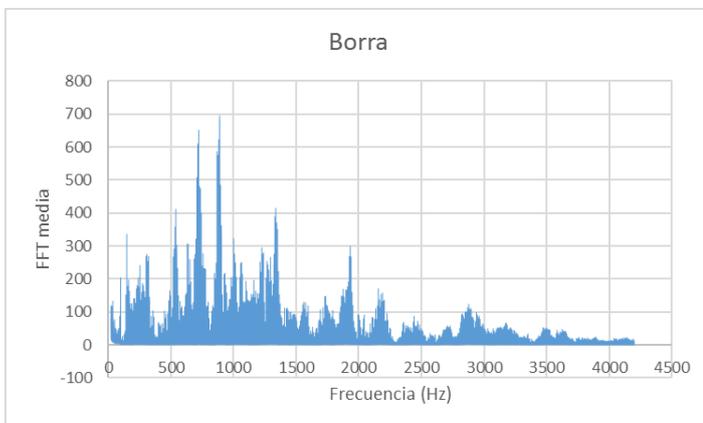
### 6.1 PESO Y DIMENSIONES

Como se puede observar en el apartado de materiales y métodos, se ha diseñado una tabla donde aparecen todos los pesos y las dimensiones de las diferentes planchas de madera y de los nuevos materiales.

En cuanto a las dimensiones, se puede apreciar una leve desviación entre las planchas de madera y las de los nuevos materiales, pero en el peso sí que se puede apreciar una desviación de alrededor del 50%. Seguidamente se va a observar si estos resultados afectan en el estudio de la acústica de los materiales.

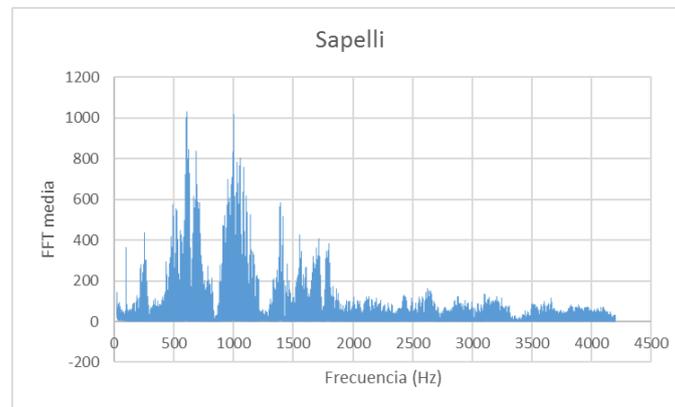
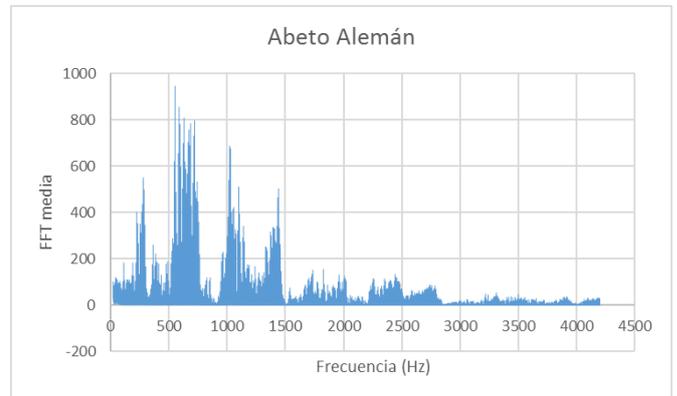
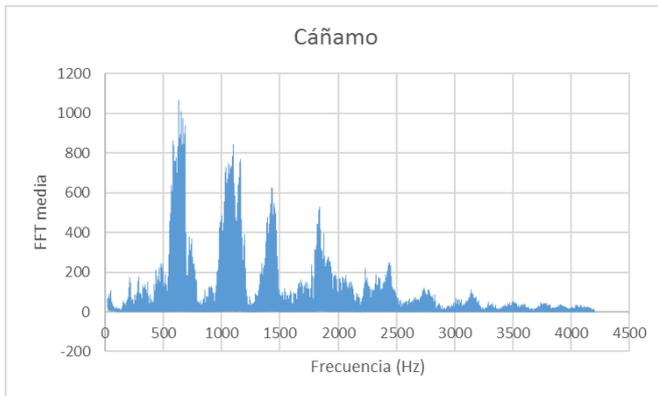
### 6.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS GRÁFICOS FFT MEDIA-FRECUENCIA(HZ)

Comparando el gráfico de la Borra con los de las maderas, se puede observar como este se parece mucho al cedro amarillo y al abeto engelmann. Los picos más representativos de la borra están situados a 500Hz, 700Hz, 900Hz, 1300Hz, 1900Hz y 2900Hz. Estos picos se pueden apreciar en mayor proporción en el caso del cedro amarillo, aunque el abeto engelmann también es un candidato a tener en cuenta. Se puede decir que estos materiales presentan los picos más representativos en el rango de Hz audibles, además de mostrar armónicos amplios y equilibrados.

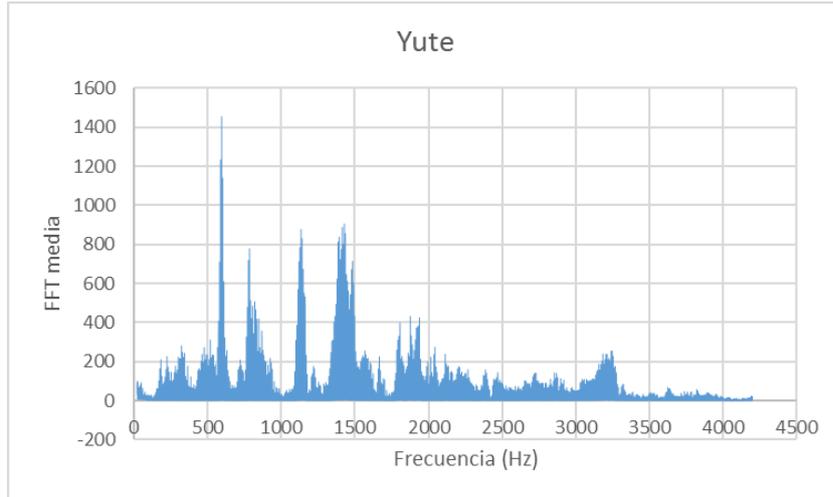


En el caso del cáñamo, presenta armónicos más amplios y equilibrados que la borra. Los picos más representativos estarían en: 600Hz, 1100Hz, 1400Hz, 1800Hz y 2400Hz. Para el cáñamo, la madera que más se le parecería a su comportamiento sería el abeto alemán, ya que muestra unos picos muy parecidos y a unas frecuencias muy parecidas, menos en el rango comprendido entre 0Hz y 500Hz y entre 2000Hz y 2500Hz. En el primer rango, el abeto muestra un mayor pico que se compensa con el segundo rango mencionado, ya que el cáñamo en esta zona presenta una mayor concentración de armónicos que el abeto.

Por otro lado, otro tipo de madera con la que se aprecian coincidencias con el cáñamo, sería el sapelli. La amplitud de los armónicos es la misma y las frecuencias a las que aparecen los picos más representativos coinciden. En este caso, la mayor diferencia recaería en el rango comprendido entre los 1500Hz -2000Hz. Parece como si el pico de 1500Hz se hubiese dividido en varios más pequeños.



En último lugar, el yute es el material más diferente comparado con el de las maderas. Presenta un pico muy elevado que llega hasta los 1400. Este valor tan elevado no se observa en ninguna otra madera. También es el que presenta unos armónicos más estrechos y menos equilibrados de los tres nuevos materiales estudiados.



### 6.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LAS TABLAS DE CRITERIOS PSICOACÚSTICOS

Criterios psicoacústicos	Abeto alemán	Abeto engelmann	Abeto sitka	Cedro amarillo	Cedro rojo	Mongoy	Sapelli
Sonoridad	36,6225	37,2675	33,665	33,5125	33,57	38,2	37,09
Agudeza	1,365	1,2875	1,2775	1,3175	1,2625	1,4025	1,415
Tonalidad	0,5925	0,685	0,6675	0,775	0,6475	0,3875	0,755
Aspereza	1,115	1,12	1,01	1,1825	1,1925	1,14	1,21
Sensación de agrado	0,19	0,215	0,2725	0,2425	0,2425	0,1475	0,185

Tabla 18: Resumen de los resultados criterios psicoacústicos maderas

Criterios psicoacústicos	Cáñamo	Borra	Yute
Sonoridad	34,765	29,515	35,49
Agudeza	1,72	1,41	1,59
Tonalidad	0,25	0,615	0,505
Aspereza	1,525	1,45	1,115
Sensación de agrado	0,075	0,19	0,155

Tabla 19: Resumen de los resultados criterios psicoacústicos nuevos materiales

En las tablas anteriores, se pueden observar con mayor claridad los criterios psicoacústicos obtenidos para cada madera y para cada nuevo material.

La borra parece ser el material con una menor sonoridad, mientras que las maderas mongoy, sapelli y abeto engelmann son los que mayor nivel de sonoridad presentan.

El cáñamo y el yute se acercan más a los parámetros sonoros obtenidos en las maderas, como: abeto sitka, cedro amarillo, cedro rojo...

Por otro lado, la agudeza parece ser un parámetro bastante estable menos por los 1,72 acum del cáñamo y los 1,59 del yute.

La tonalidad varía más de unos materiales a otros. El cáñamo presenta una menor tonalidad comparado con el valor del cedro amarillo. En las maderas, este parámetro se mantiene alrededor de los 0,60-0,70 tu.

La aspereza de los nuevos materiales aumenta un 20% más respecto a los valores obtenidos en las maderas. Siendo el mayor el cáñamo y el menor el abeto sitka.

En cuanto a la sensación de agrado de los materiales, al ser un parámetro bastante subjetivo, se van a tener más en cuenta los resultados de las encuestas que los obtenidos mediante la fórmula:

$$\frac{P}{P_0} = e^{-0,7 \frac{R}{R_0}} \cdot e^{-1,08 \frac{S}{S_0}} \cdot (1,24 - e^{\frac{2,43 T}{T_0}}) \cdot e^{-\left(\frac{0,023 N}{N_0}\right)^2}$$

Donde P es agradabilidad, R aspereza, S agudeza, T tonalidad y N sonoridad percibida.

El abeto sitka, en las tablas, parece ser la madera con mejor sensación sonora, mientras que en las encuestas se ha obtenido que son el abeto alemán y el abeto engelmann. En el caso de los nuevos materiales la borra es el material más agradable sonoramente y en las encuestas ha salido el yute. Estos resultados tan dispares pueden ser debidos a la falta de conocimiento en la materia de las personas encuestadas. Para mejorar esta variable en particular, se van a seguir realizando encuestas a gente que entienda de música y de vibroacústica para poder comprobar que esta afirmación es correcta.

Por otro lado, se puede observar que la borra ha obtenido el mismo valor en sensación sonora que el abeto alemán.

Como resultado final, la borra sería el nuevo material que se parece más a la madera. El yute y el cáñamo sin embargo presenta unos datos más dispares al contemplar los resultados de las diferentes maderas.

## 6.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ESPECTROGRAMAS

Se debe de tener en cuenta que la frecuencia mínima para configurar el espectrograma es de 50HZ y la máxima de 4000HZ. La frecuencia del proyecto es de 44.100HZ. Se deberán remuestrear los espectros para llegar a esa frecuencia, ya que la función utilizada en el programa Matlab, se había calculado para obtener un muestreo de 25.000Hz/segundo y no para los 44.100Hz, debido a que la tarjeta de adquisición de datos no permite muestrear a más. Sin una frecuencia de trabajo de 44.100Hz no se pueden calcular los criterios psicoacústicos.

Las siguientes gráficas que se van a comentar, representan la duración del sonido en el tiempo. Los colores del gráfico van desde el blanco al azul. La parte más coloreada en tonos blancos y rojizos se corresponde con el impacto de la bola con el material, seguidamente este sonido se propaga en el tiempo generando una onda expansiva que va disminuyendo a su paso hasta llegar a la zona colorada de azul, donde el sonido ya ha desaparecido.

Para hacer este experimento, se han utilizado don esferas de acero de 10mm y 17 mm respectivamente. En primer lugar, están representados los espectros al hacer colisionar la esfera de 10mm sobre el material y en segundo lugar la de 17mm. Debido a ello, se puede apreciar como con la bola mayor, se obtiene un sonido más prolongado en el tiempo.

En las maderas, se han representado más espectrogramas debido a que cada madera presenta una dirección paralela y otra perpendicular. En este caso, se puede ver como el sonido se consigue propagar mejor y permanecer más tiempo con la dirección perpendicular.

Los materiales se encuentran en voladizo, sujetos únicamente en un extremo. Al hacer impactar la bola en la dirección perpendicular a sus fibras, la madera mostrará una mayor resistencia a la deformación que si se realizase en paralelo. Debido a ello, el sonido rebotará más y se mostrará más agudo.

En el caso de la borra, presenta un espectro bastante parecido al del abeto alemán b10 y b17 en perpendicular y, por otro lado, también se parece al del cedro rojo en ambas direcciones.

La borra se puede apreciar que llega hasta los 0.40 segundos o 0.50 segundos en el caso del impacto con la esfera de 17mm. Estas maderas también presentan estos picos, además de mostrarlos alrededor de los 2 kHz.

El cáñamo, sin embargo, tiene un comportamiento más parecido al del abeto alemán en dirección paralela. Presenta un espectro más amplio y equilibrado respecto al tiempo. No presenta picos pronunciados, sino un recorrido uniforme con el tiempo.

En último lugar, el yute parece una combinación de los dos espectros de los dos materiales anteriormente nombrados, la borra y el cáñamo. Presenta un espectro amplio, pero con un pequeño pico alrededor de los 1kHz, llegando hasta los 0,55 segundos en ambos casos. En este caso, las esferas de diferente tamaño no parecen afectar en gran medida el espectro del material.

El yute b10 podría decirse que es prácticamente igual al abeto alemán b10 par. La amplitud del espectro es la misma, pero el pico en el caso del abeto parece ser más corto. Por otro lado, el abeto sitka b17 par también presenta un comportamiento muy parecido al del yute b17.

## 6.5 TABLA MULTICRITERIO

Criterios psicoacústicos	Abeto alemán	Abeto engelmann	Abeto sitka	Cedro amarillo	Cedro rojo	Mongoy	Sapelli	Cáñamo	Borra	Yute
Sonoridad	7,32	7,45	6,73	6,70	6,71	7,64	7,42	6,95	5,90	7,10
Agudeza	10,19	9,62	9,54	9,84	9,43	10,47	10,57	12,85	10,53	11,87
Tonalidad	14,09	16,30	15,88	18,44	15,40	9,22	17,96	5,95	14,63	12,01
Aspereza	3,23	3,25	2,93	3,43	3,46	3,31	3,51	4,42	4,20	3,23

Una vez normalizados todos los datos, se puede pasar a comparar los resultados obtenidos.

Se puede observar como la borra a pesar del valor tan bajo en sonoridad que presenta, se parece bastante al cedro rojo (madera utilizada para fabricar guitarras flamencas por sus tonalidades más agudas). Su agudeza y tonalidad son prácticamente las mismas. El cáñamo, sin embargo, es el material que menos coincidencias presenta con las maderas. Su sonoridad y tonalidad es muy baja es comparación con dichos materiales.

Por último, el yute, es un material con unas condiciones bastante buenas para ser un buen candidato a sustituir a las maderas. Su sonoridad es más elevada que la de la borra, mientras

que su aspereza es menor. Con estos resultados se acerca bastante al comportamiento del abeto alemán.

Por tanto, se puede afirmar que el cáñamo no sería un buen material para sustituir a la madera en la fabricación de instrumentos musicales, mientras que la borra y el yute son materiales con óptimas propiedades para ser utilizados para dicho fin.

## 7. CONCLUSIONES

## 7 CONCLUSIONES

Tras realizar una intensa búsqueda se han escogido el yute, el cáñamo y la borra como posibles materiales que se pueden emplear para fabricar instrumentos musicales y sustituir de este modo la madera en estos.

Debido a la elevada deforestación de las maderas de alta calidad que se utilizan para fabricar instrumentos musicales, las grandes empresas que elaboran estos instrumentos están buscando desesperadamente un material que la pueda sustituir y que mantenga las mismas propiedades vibroacústicas.

En el presente proyecto se ha investigado que nuevo material se podría emplear para dicho fin. Para ello se han realizado diferentes experimentos entre los que cabe destacar: análisis de las FFT media respecto a la frecuencia, elaboración de una tabla de criterios psicoacústicos, análisis de los diferentes espectrogramas y, finalmente, la elaboración de una tabla multicriterio donde poder sacar una conclusión de que material o materiales serían los más idóneos para sustituir a la madera.

Además de fijarse en las características psicoacústicas de los nuevos materiales, se han intentado buscar materiales compuestos biodegradables que además de ofrecer un buen sonido en los instrumentos, ayuden al desarrollo sostenible del medio ambiente.

Tras analizar los resultados, se han podido descubrir varios aspectos interesantes al respecto:

El sonido de las maderas es diferente tras ensayarlas en dirección paralela y perpendicular a sus fibras. En dirección paralela suenan más agudas debido a que en esta dirección aparecen menos módulos de elasticidad que en dirección perpendicular.

Por otro lado, se va observado que las maderas utilizadas para las tapas de las guitarras no tienen las mismas características psicoacústicas que las utilizadas para los bordes de las guitarras o los mástiles.

En el caso del peso, las maderas presentan un menor peso que los nuevos materiales. Este hecho no ha influenciado en gran medida a los resultados finales, ya que se han obtenido resultados muy comparables.

Finalmente, tras analizar todos los resultados de manera exhaustiva, el cáñamo no presenta buenas propiedades para sustituir a la madera en la fabricación de instrumentos musicales. Sin embargo, la borra y el yute son materiales con muy buenas propiedades. Se han podido observar muchas coincidencias con la familia de los abetos y la de los cedros.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

## 8 BIBLIOGRAFÍA

Arevalo Fuentes, R. y Londoño Arango, A. (2005). "Manual para la identificación de maderas que se comercializan en el departamento del Tolima". Impresiones conde. Ibagué. Tolima.

Ajith Damodaran, Hossein Mansour, Larry Lessard, Gary Scavone y Suresh Babu, A. (2015). "Application of composite material to the chenda, an Indian percussion instrument". Applied Acoustics. ScienceDirect.

Mehran Roohnia, Seyed-Fariborz Hashemi-dizaji, Loic Brancheriau. (2011). "Effect of soaking process in water on the acoustical quality of Wood for traditional musical instruments". BioResources.

Jose Antonio Bellido. (2012). "Propiedades físicas, mecánicas y geométricas de la madera". Universidad Central de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Escuela de Ingeniería Civil en Obras Civiles.

Ricardo Faustino Teles, Alexandre Florian da Costa, Lucas Bichara de Lima. 23th International Congress on Sound and Vibration. "Influence on Wood finishing products on the vibro-acoustical properties of tropical Woods".

Michael Fréva. (2009). "Passer de la guitare au oud et du oud à la guitare". Publié sous licence Creative Commons BY-SA. Paternité (BY) - Partage des Conditions Initiales à l'Identique (SA).

Mitsuko Aramaki, Henri Bailleres and Loic Brancheriau. (2007). "Sound quality assessment of Wood for xylophone bars". Acoustical Society of America.

MADERAS BARBER SL. <<https://maderasbarber.com/>>

MIGUEL MATEO LUTHIER. <<https://www.miguelmateoluthier.com/>>

ESCUELA MASTERMUSIC. *Tipos de madera para los instrumentos musicales.* <<http://mastermusicperu.blogspot.com.es/2015/08/tipos-de-maderas-para-los-instrumentos.html>>

Gil, J. M. (2008) Manual para la construcción de la guitarra clásica y española.

GOBIERNO VASCO. *Manual técnico de formación para la caracterización de madera de uso estructural(Sapeli)* <<http://normadera.tknika.net/es/content/ficha/sapeli>>

ASTUR DE MADERAS S.A. *Madera sapelli* <<http://astumasa.com/content/32-madera-sapelli>>

Musicwood. Filmshop. 2013

AIRTECH INTERNATIONAL S.L. *Infusión de resina.* <<http://www.airtechintl.com/es/resin-infusion>>

## 9. APÉNDICE

## 9 APÉNDICE

### 9.1 ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: DIMENSIONES Y PESOS DE LAS CHAPAS DE MADERA UTILIZADAS .....	22
TABLA 2: DIMENSIONES Y PESOS DE LOS NUEVOS MATERIALES FABRICADOS .....	22
TABLA 3: PROPIEDADES FÍSICAS, TECNOLÓGICAS Y MECÁNICAS DEL ABETO ALEMÁN, ENGELMANN Y SITKA. ....	29
TABLA 4: PROPIEDADES FÍSICAS, TECNOLÓGICAS Y MECÁNICAS DEL CEDRO AMARILLO Y ROJO. ....	29
TABLA 5: PROPIEDADES FÍSICAS, TECNOLÓGICAS Y MECÁNICAS DEL MONGOY Y SAPELLI. ....	29
TABLA 6: SONIDOS SEMEJANTES.....	37
TABLA 7: CRITERIOS PSICOACÚSTICOS ABETO ALEMÁN .....	45
TABLA 8: CRITERIOS PSICOACÚSTICOS ABETO ENGELMANN .....	45
TABLA 9: CRITERIOS PSICOACÚSTICOS ABETO SITKA .....	45
TABLA 10: CRITERIOS PSICOACÚSTICOS CEDRO AMARILLO.....	46
TABLA 11: CRITERIOS PSICOACÚSTICOS CEDRO ROJO .....	46
TABLA 12: CRITERIOS PSICOACÚSTICOS MONGOY .....	46
TABLA 13: CRITERIOS PSICOACÚSTICOS SAPELLI .....	46
TABLA 14: CRITERIOS PSICOACÚSTICOS CÁÑAMO.....	47
TABLA 15: CRITERIOS PSICOACÚSTICOS BORRA .....	47
TABLA 16: CRITERIOS PSICOACÚSTICOS YUTE .....	47
TABLA 17: TABLA MULTICRITERIO.....	54
TABLA 18: RESUMEN DE LOS RESULTADOS CRITERIOS PSICOACÚSTICOS MADERAS.....	58
TABLA 19: RESUMEN DE LOS RESULTADOS CRITERIOS PSICOACÚSTICOS NUEVOS MATERIALES.....	58

### 9.2 ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1: ABETO ALEMÁN.....	7
ILUSTRACIÓN 2: ABETO SITKA .....	7
ILUSTRACIÓN 3: ABETO ENGELMAN .....	7
ILUSTRACIÓN 4: CEDRO ROJO (IZQUIERDA) Y CEDRO AMARILLO (DERECHA) .....	8
ILUSTRACIÓN 5: MONGOY .....	8
ILUSTRACIÓN 6: SAPELLI .....	9
ILUSTRACIÓN 7: CORTE Y TROCEADO DE LA MADERA.....	9
ILUSTRACIÓN 8: SISTEMA AUDITIVO HUMANO.....	12
ILUSTRACIÓN 9: CURVAS DE IGUAL NIVEL SONORO (ISO R226).....	13
ILUSTRACIÓN 10: CURVA DE CORRELACIÓN ENTRE FONOS Y SONOS. ....	14
ILUSTRACIÓN 11: RUGOSIDAD EN FUNCIÓN DEL GRADO DE MODULACIÓN.....	15
ILUSTRACIÓN 12: RUGOSIDAD EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA DE MODULACIÓN .....	16
ILUSTRACIÓN 13: RUGOSIDAD EN FUNCIÓN DE LA DESVIACIÓN EN FRECUENCIA.....	17
ILUSTRACIÓN 14: NUEVOS MATERIALES .....	22
ILUSTRACIÓN 15: MONTAJE EXPERIMENTAL 1.....	23
ILUSTRACIÓN 16: SHAKER .....	24
ILUSTRACIÓN 17: EQUIPO GENERADOR DE FUNCIONES.....	24
ILUSTRACIÓN 18: FUNCIONES Y CONTROLES BÁSICOS PARA DESCRIBIR SU FUNCIONAMIENTO .....	25
ILUSTRACIÓN 19: TIPO DE SEÑAL DE SALIDA (A-TRIANGULAR, B-CUADRADA O C-SENOIDAL) .....	26
ILUSTRACIÓN 20: MONTAJE EXPERIMENTAL 2.....	27
ILUSTRACIÓN 21: ENSAYO DE LA DUREZA DE UNA MADERA POR EL MÉTODO MONNIN O CHALAIS MEUDON.....	30
ILUSTRACIÓN 22: POSICIÓN SHAKER RESPECTO AL MATERIAL A ESTUDIAR .....	32
ILUSTRACIÓN 23: MONTAJE EXPERIMENTAL FABRICACIÓN DE LOS NUEVOS MATERIALES .....	33

### 9.3 ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1: RESPUESTAS ENCUESTA A QUE SONIDO DE LAS MADERAS ES MÁS AGRADABLE .....	36
GRÁFICO 2: RESPUESTAS ENCUESTA A QUE SONIDO DE LOS NUEVOS MATERIALES ES MÁS AGRADABLE .....	36
GRÁFICO 3: SONIDO QUE SE PARECE MÁS AL DE UNA MADERA.....	37
GRÁFICO 4: ABETO ALEMÁN FFT MEDIA- FRECUENCIA (Hz) .....	38
GRÁFICO 5: ABETO ENGELMANN FFT MEDIA-FRECUENCIA (Hz) .....	39
GRÁFICO 6: ABETO SITKA FFT MEDIA-FRECUENCIA (Hz) .....	39
GRÁFICO 7: CEDRO AMARILLO FFT MEDIA-FRECUENCIA (Hz) .....	40
GRÁFICO 8: CEDRO ROJO FFT MEDIA-FRECUENCIA (Hz) .....	40
GRÁFICO 9: MONGOY FFT MEDIA-FRECUENCIA (Hz) .....	41
GRÁFICO 10: SAPELLI FFT MEDIA-FRECUENCIA(Hz).....	41
GRÁFICO 11: COMPARATIVA FFT MEDIA-FRECUENCIA(Hz) DE TODAS LAS MADERAS .....	42
GRÁFICO 12: BORRA FFT MEDIA-FRECUENCIA(Hz) .....	43
GRÁFICO 13: CÁÑAMO FFT MEDIA-FRECUENCIA(Hz) .....	43
GRÁFICO 14: YUTE FFT MEDIA-FRECUENCIA(Hz) .....	44
GRÁFICO 15: COMPARACIÓN FFT MEDIA-FRECUENCIA (Hz) NUEVOS MATERIALES.....	44
GRÁFICO 16: ESPECTROGRAMA ABETO ALEMÁN B10 PAR .....	48
GRÁFICO 17: ESPECTROGRAMA ABETO ALEMÁN B10 PER.....	48
GRÁFICO 18: ESPECTROGRAMA ABETO ALEMÁN B17 PAR .....	48
GRÁFICO 19: ESPECTROGRAMA ABETO ALEMÁN B17 PER.....	48
GRÁFICO 20: ESPECTROGRAMA ABETO ENGELMANN B10 PAR.....	48
GRÁFICO 21: ESPECTROGRAMA ABETO ENGELMANN B10 PER.....	49
GRÁFICO 22: ESPECTROGRAMA ABETO ENGELMANN B17 PAR.....	49
GRÁFICO 23: ESPECTROGRAMA ABETO ENGELMANN B17 PER.....	49
GRÁFICO 24: ESPECTROGRAMA ABETO SITKA B10 PAR .....	49
GRÁFICO 25: ESPECTROGRAMA ABETO SITKA B10 PER.....	49
GRÁFICO 26: ESPECTROGRAMA ABETO SITKA B17 PAR .....	49
GRÁFICO 27: ESPECTROGRAMA ABETO SITKA B17 PER.....	50
GRÁFICO 28: ESPECTROGRAMA CEDRO AMARILLO B10 PAR.....	50
GRÁFICO 29: ESPECTROGRAMA CEDRO AMARILLO B10 PER .....	50
GRÁFICO 30: ESPECTROGRAMA CEDRO AMARILLO B17 PAR.....	50
GRÁFICO 31: ESPECTROGRAMA CEDRO AMARILLO B17 PER .....	50
GRÁFICO 32: ESPECTROGRAMA CEDRO ROJO B10 PAR.....	50
GRÁFICO 33: ESPECTROGRAMA CEDRO ROJO B10 PER.....	51
GRÁFICO 34: ESPECTROGRAMA CEDRO ROJO B17 PAR.....	51
GRÁFICO 35: ESPECTROGRAMA CEDRO ROJO B17 PER.....	51
GRÁFICO 36: ESPECTROGRAMA MONGOY B10 PAR.....	51
GRÁFICO 37: ESPECTROGRAMA MONGOY B10 PER .....	51
GRÁFICO 38: ESPECTROGRAMA MONGOY B17 PAR.....	51
GRÁFICO 39: ESPECTROGRAMA MONGOY B17 PER .....	52
GRÁFICO 40: ESPECTROGRAMA SAPELLI B10 PAR .....	52
GRÁFICO 41: ESPECTROGRAMA SAPELLI B10 PER.....	52
GRÁFICO 42: ESPECTROGRAMA SAPELLI B17 PAR .....	52
GRÁFICO 43: ESPECTROGRAMA SAPELLI B17 PER.....	52
GRÁFICO 44: ESPECTROGRAMA BORRA B10 .....	52
GRÁFICO 45: ESPECTROGRAMA BORRA B17 .....	53
GRÁFICO 46: ESPECTROGRAMA CÁÑAMO B10.....	53
GRÁFICO 47: ESPECTROGRAMA CÁÑAMO B17 .....	53
GRÁFICO 48: ESPECTROGRAMA YUTE B10.....	53
GRÁFICO 49: ESPECTROGRAMA YUTE B17.....	53

## 9.4 ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1: RELACIÓN ENTRE SONOS Y FONOS .....	14
ECUACIÓN 2: SENSACIÓN DE AGRADO .....	18

