

Metodología Experimental para la Evaluación Acústica de Maderas para Guitarras

Experimental Methodology for the Acoustic Evaluation of Guitar Woods

Metodologia Experimental para Avaliação Acústica de Madeiras de Violão

Ariel Gustavo Velis, Carlos Manuel Posse, Raúl Luis Zerbino, Gustavo Basso

Correo electrónico: arielgvelis@gmail.com

Resumen

Se presenta una metodología experimental para la caracterización acústica de maderas utilizadas en la construcción de guitarras. El objetivo es desarrollar un protocolo técnico accesible y reproducible que permita discriminar entre especies mediante el análisis de su respuesta impulsiva ante un impacto controlado. Inicialmente se ensayó un método de vibraciones forzadas en varillas, pero las limitaciones observadas motivaron el diseño de un nuevo enfoque. El método propuesto emplea placas normalizadas, impactos estandarizados y registros en cámara anecoica. Se analizaron distintas configuraciones de sujeción, validando su influencia en la frecuencia fundamental y la respuesta temporal del primer armónico. Los resultados muestran que el método permite distinguir entre maderas de diferente calidad acústica, sentando las bases para su aplicación en contextos de luthería y estudios comparativos.

Palabras clave: acústica de guitarras; respuesta impulsiva maderas; caracterización vibratoria, tapas armónicas

Abstract

An experimental methodology is presented for the acoustic characterization of woods used in guitar construction. The objective is to develop an accessible and reproducible technical protocol that allows discrimination between species by analyzing their impulsive response to a controlled impact. Initially, a forced vibration method on rods was tested, but the observed limitations motivated the design of a new approach. The proposed method uses standardized plates, standardized impacts, and recordings in an anechoic chamber. Different clamping configurations were analyzed, validating their influence on the fundamental frequency and the time response of the first harmonic. The results show that the method allows discrimination between woods of different acoustic qualities, laying the groundwork for its application in lutherie contexts and comparative studies.

Keywords: musical instrument acoustics; impulse response in wood; vibrational characterization of soundboards

Resumo

É apresentada uma metodologia experimental para a caracterização acústica de madeiras utilizadas na construção de violões. O objetivo é desenvolver um protocolo técnico acessível e reproduzível que permita a discriminação entre espécies analisando sua resposta impulsiva a um impacto controlado. Inicialmente, foi testado um método de vibração forçada em barras, mas as limitações observadas motivaram o projeto de uma nova abordagem. O método proposto utiliza placas padronizadas, impactos padronizados e gravações de câmara anecóica. Diferentes configurações de fixação foram analisadas, validando sua influência na frequência fundamental e na resposta temporal do primeiro harmônico. Os resultados mostram que o método permite distinguir entre madeiras de diferentes qualidades acústicas, preparando o terreno para sua aplicação em contextos de lutheria e estudos comparativos.

Palavras-chave: acústica de instrumentos musicais; resposta impulsiva em madeira; caracterização vibracional de tampas harmônicas

1 INTRODUCCIÓN

La madera, como material constitutivo de muchos instrumentos musicales, juega un papel importante en su proceso de diseño y construcción, y contribuye a su comportamiento e identidad cultural. Las propiedades

de la madera impactan, principalmente, en la respuesta acústica (Iris Brémaud et al., 2013). Particularmente, la madera utilizada en la tapa tiene una influencia decisiva sobre la respuesta vibratoria y la calidad tonal final. Si bien existen métodos sofisticados de evaluación de maderas (ultrasonido, tomografía, espectroscopia) que

brindan alta precisión, estos resultan costosos y poco accesibles en contextos de producción artesanal o investigación intermedia. Por ello, el presente trabajo tiene como objetivo el desarrollo y validación de una metodología experimental alternativa, sencilla, económica y reproducible, que permita caracterizar de forma objetiva las propiedades acústicas de maderas destinadas a la luthería.

El trabajo se centra en establecer un protocolo de ensayo que posibilite preseleccionar maderas en base a su comportamiento vibratorio, a partir de la comparación con una madera patrón ampliamente reconocida: el abeto alemán (*Picea abies*). Esta comparación objetiva facilita la identificación de alternativas viables entre maderas locales, promoviendo su uso en la industria de la luthería y contribuyendo a la sostenibilidad y diversificación de materiales.

2 DESARROLLO EXPERIMENTAL

En la fase inicial del trabajo se realizaron múltiples pruebas de laboratorio con el objetivo de desarrollar métodos de medición capaces de caracterizar las propiedades acústicas de distintas especies de madera. Las muestras empleadas provinieron de cortes comúnmente utilizados para tapas de guitarras, cuya selección resulta determinante para la calidad sonora del instrumento. Estas piezas fueron preparadas bajo criterios estrictos para asegurar condiciones homogéneas entre ensayos. La intención fue diseñar procedimientos simples y prácticos, que posibiliten la evaluación de un gran número de muestras y garanticen resultados reproducibles. Las pruebas se orientaron a analizar la respuesta vibratoria de las maderas bajo condiciones controladas, empleando herramientas accesibles que permitieran obtener parámetros objetivos sobre su comportamiento acústico. Esta búsqueda llevó al desarrollo de dos enfoques metodológicos, que se describen a continuación.

2.1 Desarrollo inicial: método de vibraciones en varillas

El primer enfoque explorado consistió en el análisis de la respuesta vibratoria de varillas de madera sometidas a una excitación sinusoidal. Para ello, se utilizaron varillas estandarizadas con dimensiones de 280 mm de largo, 10 mm de ancho y 3 mm de espesor. La excitación fue aplicada mediante un transductor tipo "shaker", colocado en uno de los extremos de la varilla, mientras que el otro extremo permanecía libre. Esta configuración buscaba replicar condiciones ideales para el análisis de modos naturales de vibración.

El comportamiento dinámico de las varillas se registró utilizando una cámara fotográfica en combinación con una luz estroboscópica sincronizada, mientras se realizaba un barrido de frecuencia en la señal de excitación. Esta técnica permitió visualizar con nitidez los modos de vibración generados en cada muestra, identificando nodos y antinodos a lo largo de la pieza. La Figura 1 muestra un esquema del montaje experimental empleado para la visualización de los modos vibratorios. Allí se observa la disposición del transductor, la varilla de madera y el sistema óptico de captura.

Por su parte, la Figura 2 presenta una serie de imágenes reales obtenidas durante las pruebas, donde se aprecian claramente los patrones de vibración formados en las varillas bajo excitación controlada. Estas imágenes permitieron confirmar la presencia de modos propios característicos según el tipo de madera evaluada.

A pesar del valor visual y cualitativo del método, se detectaron varias limitaciones que afectaron su aplicabilidad práctica. Entre ellas, se destacan la dificultad para medir con precisión las distancias entre nodos y la necesidad de mantener una fuerza constante de excitación entre muestras. Además, el análisis visual de los resultados resultaba complejo y difícil de automatizar, lo que reducía la reproducibilidad del procedimiento. Estas restricciones motivaron el desarrollo de un segundo enfoque más robusto y cuantitativo, basado en la respuesta impulsiva de placas.

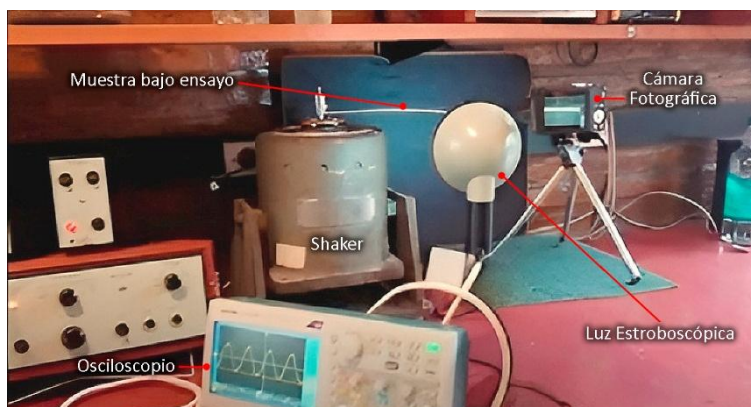
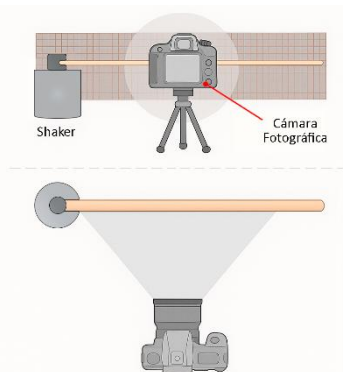


Figura 1. Esquema de visualización de modos en varillas



Figura 2. Imágenes de modos de las varillas

2.2 Método propuesto: respuesta impulsiva

Como alternativa al método de vibraciones en varillas, se desarrolló un enfoque más práctico basado en la medición de la respuesta impulsiva de placas de madera. Este nuevo método busca superar las limitaciones previamente identificadas, como la baja reproducibilidad y la dificultad para obtener parámetros cuantificables. A través de un sistema de impacto controlado y registro acústico en condiciones anecoicas, se logró diseñar un procedimiento más preciso y sistemático.

Para validar el método, se seleccionaron tres tipos de madera de características contrastantes: abeto alemán, pino Brasil y terciado de guatambú. A continuación, se describen los aspectos principales del nuevo protocolo propuesto.

2.2.1. Preparación de muestras

El trabajo se inició con la selección de tres especies de madera de características diferenciadas: abeto alemán (*Picea abies*), pino Brasil (*Araucaria angustifolia*) y una placa terciada de guatambú (*Balfourodendron riedelianum*), que se denominará aquí simplemente "terciado".

Las muestras fueron cortadas con dimensiones estandarizadas de 55 mm de ancho, 124 mm de largo y 3 mm de espesor, similares a las empleadas para tapas de guitarras. Para asegurar uniformidad entre ensayos, se almacenaron en condiciones estables de temperatura y humedad.

A continuación, se describen brevemente las características anatómicas y propiedades relevantes de cada especie:

Abeto alemán (*Picea abies*): obtenida mediante corte radial, es una madera liviana con densidad inferior a 0,450 g/cm³. Se caracteriza por tener anillos de crecimiento bien marcados (1 a 2 mm de ancho), canales resiníferos escasos, radios uniseriados y traqueidas radiales de paredes internas lisas. Se utilizó como referencia por su reconocido uso en guitarras de alta calidad.

Pino Brasil (*Araucaria angustifolia*): esta muestra, de calidad intermedia, se trabajó con tablas de corte tangencial o mixto. Su densidad varía entre 0,450 y

0,600 g/cm³. Tiene anillos de crecimiento bien definidos (4 a 8 mm de ancho), sin canales resiníferos, y presenta traqueidas axiales con punteaduras biseriadas alternas muy largas.

Terciado de guatambú (*Balfourodendron riedelianum*): representa una muestra de baja calidad acústica. Es una madera semipesada a pesada, con densidad aparente entre 0,780 y 0,820 g/cm³. Su estructura está compuesta por capas de fibras en distintas orientaciones, lo que afecta negativamente la homogeneidad vibratoria. Anatómicamente, presenta porosidad difusa, fibras libriformes de paredes gruesas y parénquima axial en bandas angostas.

2.2.2. Sistema de Medición

El ensayo se realizó en la cámara anecoica del Laboratorio de Acústica y Luminotecnia de la CIC, lo que permitió registrar exclusivamente la energía sonora emitida por la muestra, sin interferencias provenientes de reflexiones acústicas. Esta condición de campo libre fue clave para mejorar la precisión en la detección de frecuencias resonantes y en el análisis de la respuesta temporal.

El impacto fue generado mediante un "aparejo de impacto" con martillo calibrado (Figura 3). La respuesta acústica fue captada por un micrófono de condensador (Brüel & Kjær Type 4189) con preamplificador (ZC-0032), digitalizada mediante una placa Tascam US-322 y registrada con el software Reaper. Posteriormente, las señales fueron procesadas utilizando los analizadores espectrales Voxengo SPAN Plus y Sonic Visualiser, permitiendo una visualización detallada del contenido frecuencial. La Figura 4 muestra una fotografía real del montaje experimental.

2.2.3. Modos de sujeción evaluados

Para evaluar la influencia de la configuración mecánica en las propiedades resonantes de las muestras, se analizaron cuatro modos distintos de sujeción en el aparejo de impacto. La hipótesis inicial fue que los modos propios de resonancia podrían amplificarse o atenuarse según el tipo de sujeción utilizado.

Las configuraciones ensayadas se muestran en la Figura 5 y fueron:

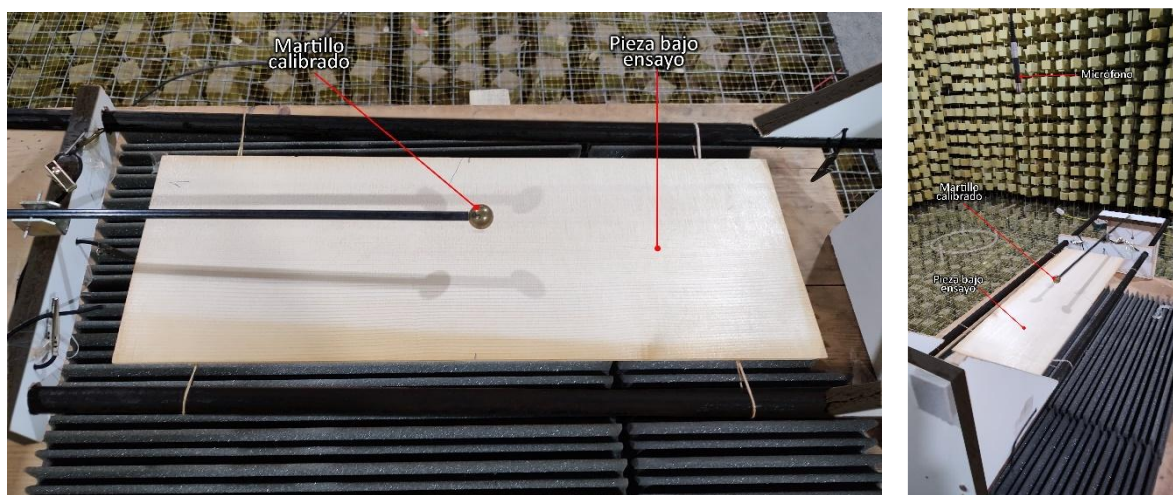


Figura 3. Fotografía del aparato de impacto situado en la Cámara Anecoica

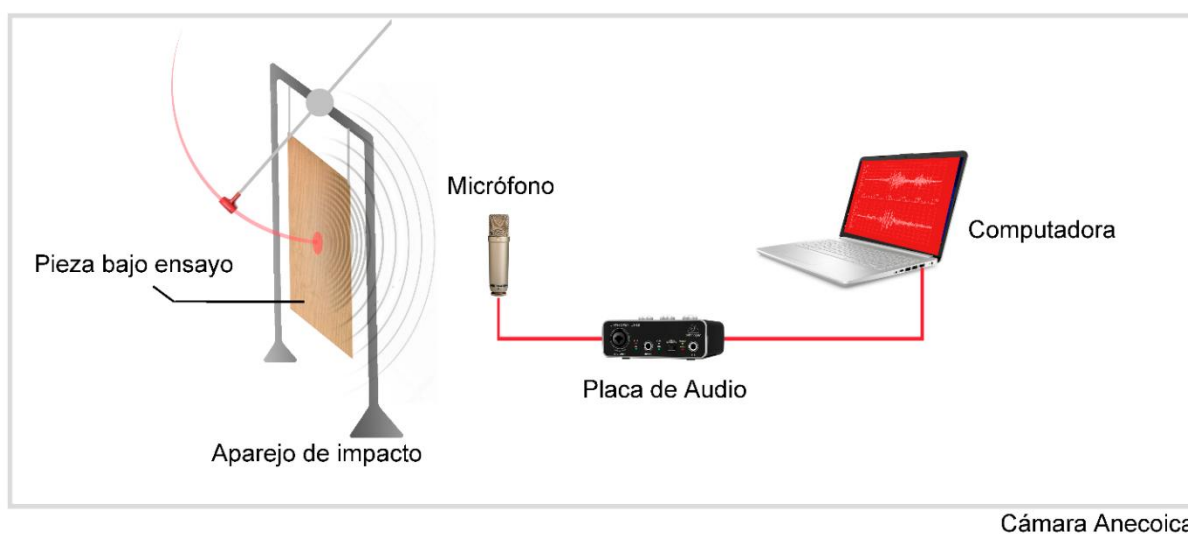


Figura 4. Esquema del sistema de medición mediante el método impulsivo

- A. Posición vertical con un punto de sujeción.
- B. Posición vertical con dos puntos de sujeción.
- C. Posición horizontal con cuatro puntos de sujeción.
- D. Posición horizontal con bandas elásticas, donde la muestra quedaba suspendida en contacto con dos bandas elásticas en dirección perpendicular a la veta de la madera.

Cada configuración fue ensayada mediante múltiples repeticiones, con el fin de detectar posibles diferencias en la respuesta vibratoria y evaluar la reproducibilidad del método. La digitalización de las señales acústicas permitió obtener funciones de transferencia detalladas para cada muestra, facilitando la comparación entre especies.

Los primeros resultados mostraron que la madera de referencia (abeto alemán) presentó espectros acústicos con picos de resonancia bien definidos y

patrones de valles consistentes en todas las mediciones. En contraste, otras especies con menor capacidad resonante evidenciaron variaciones significativas en la amplitud y frecuencia de sus picos y valles, lo que permitió poner en evidencia diferencias relevantes en sus propiedades acústicas.

2.2.4 Procesamiento de Datos y Obtención de Frecuencias de Resonancia

El análisis de las respuestas digitales fue confinado a una banda de frecuencias apropiado para evaluar exclusivamente la frecuencia fundamental y los primeros modos de vibración de las piezas bajo ensayo. Para ello, y evaluando los espectros para cada muestra, se estableció como banda de interés el rango entre 25 Hz y 200 Hz. En dicha banda se observó claramente que concurrían las frecuencias de resonancia fundamentales de cada especie.

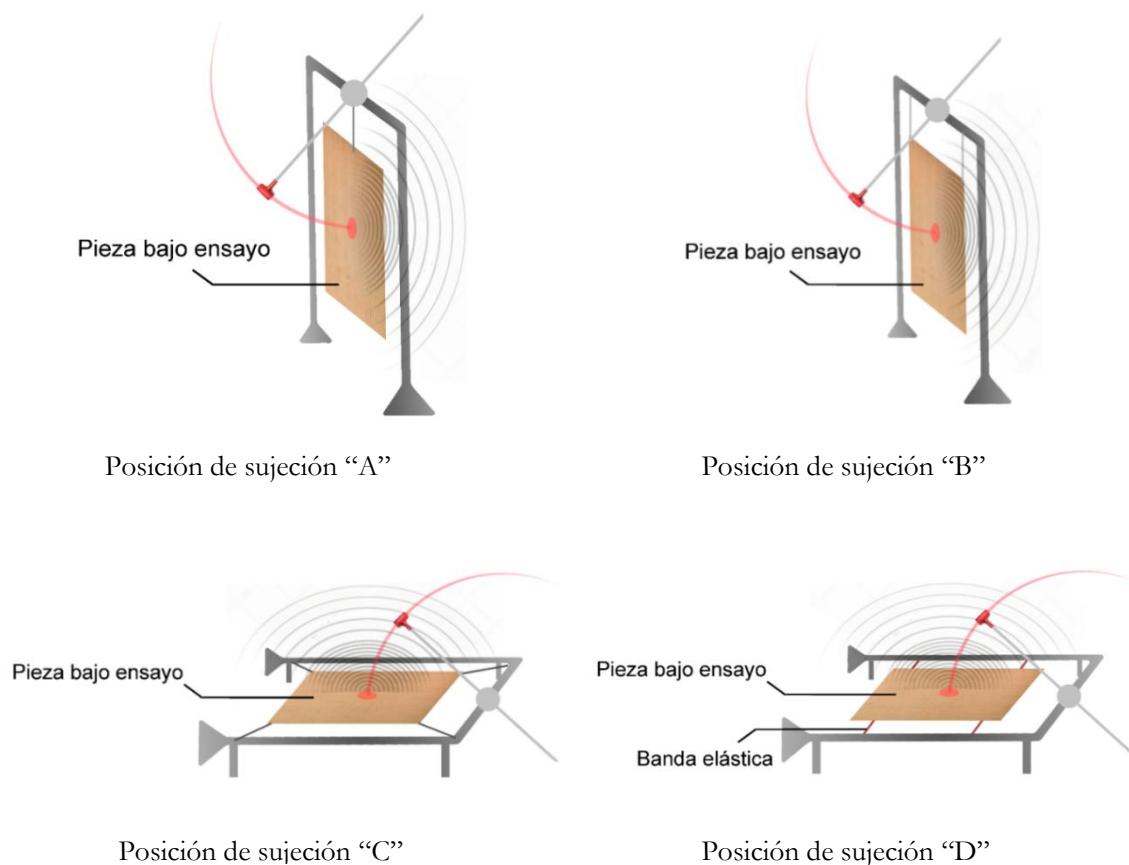


Figura 5. Diferentes modos de montaje ensayados

Como primer paso, y para garantizar la calidad del análisis en la banda de frecuencias de interés, se aplicó a todas las respuestas un filtro digital de fase lineal pasa banda con un corte inferior de -3 dB en 25 Hz. y corte superior de -3 dB en 200 Hz. Con una pendiente de atenuación de 24 dB/octava. Este filtrado eliminó componentes de baja y alta frecuencia no deseadas, que podrían haber dificultado la interpretación de los resultados.

Para obtener con precisión las frecuencias de resonancia, los archivos de audio en formato WAV fueron analizados utilizando el software Sonic Visualiser.

Se generaron espectrogramas de los trenes de respuestas acústicas, que luego fueron exportados a planillas de cálculo aplicando los siguientes parámetros de configuración:

- Window size: 32768
- Window overlap: 93.75 %
- Oversampling: 8x

Estos parámetros tuvieron un impacto significativo en la precisión de la extracción de frecuencias. El tamaño de ventana grande permitió alcanzar una alta resolución espectral, reduciendo la dispersión en frecuencia y mejorando la exactitud de las mediciones.

El alto solapamiento (93,75 %) favoreció la continuidad temporal del análisis, minimizando discontinuidades entre ventanas consecutivas. Por su parte, el factor de oversampling 8x aumentó la densidad de puntos de muestreo en el dominio de la frecuencia, refinando la detección de picos de resonancia.

Una vez exportados los datos, se aplicaron fórmulas de cálculo y formato condicional en la planilla de cálculo para detectar con precisión los valores máximos de amplitud y sus respectivas frecuencias. Posteriormente, se graficaron los niveles correspondientes a la frecuencia del primer armónico, normalizados al valor pico, para todos los impactos, todas las especies de madera y todos los tipos de sujeción, permitiendo así una comparación detallada entre ellos.

La resolución temporal obtenida en la planilla fue de 0,042 segundos, mientras que la resolución en frecuencia alcanzó 0,1831 Hz, lo que garantizó una identificación precisa de las frecuencias fundamentales y de sus armónicos.

3 RESULTADOS

3.1 Variabilidad del espectro resultante en función del tipo de sujeción

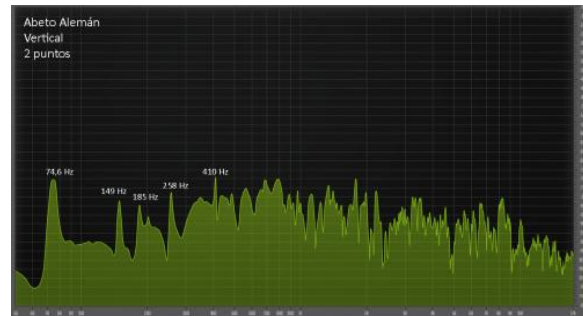
Como primer análisis, se obtuvieron los espectros de las respuestas generados por el software Voxengo SPAN Plus, utilizando el modo de operación "MAX". Este tipo de análisis produce un espectro de potencia máxima acumulada y registra una retención de los picos a lo largo del tiempo, permitiendo una visualización clara de las componentes dominantes de la respuesta.

Se observó que el método de sujeción influye tanto en la relación de amplitudes entre la frecuencia fundamental y los sobretonos, como en los valores de frecuencia de estos últimos, incluso cuando se trata de una misma muestra de madera.

Este comportamiento es coherente con la expectativa, ya que los modos de vibración están directamente condicionados por las restricciones impuestas por los puntos de anclaje. Cambiar las condiciones de contorno, incluso de una placa simple, puede cambiar significativamente tanto las frecuencias de resonancia como sus modos (Richard Mark French et al., 2008).



Abeto Alemán sujeción "A"



Abeto Alemán sujeción "B"



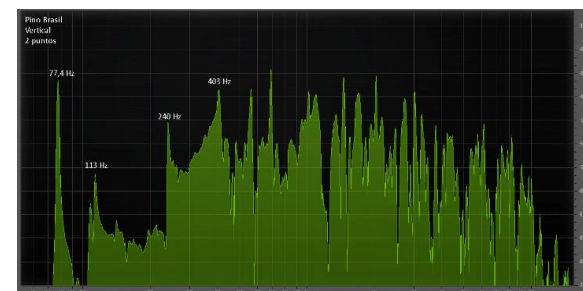
Abeto Alemán sujeción "C"



Abeto Alemán sujeción "D"



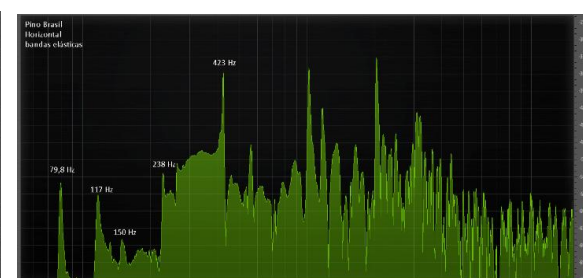
Pino Brasil sujeción "A"



Pino Brasil sujeción "B"



Pino Brasil sujeción "C"



Pino Brasil sujeción "D"

Figura 6. Espectros Obtenidos con una muestra de Abeto alemán y otra de Pino Brasil con los 4 modos de sujeción

En la Figura 6 se presentan ejemplos de estos espectros para las maderas Abeto Alemán y Pino Brasil, bajo diferentes configuraciones de sujeción.

Dado que cuantificar sistemáticamente las variaciones espectrales asociadas a cada sujeción representaba una tarea muy compleja, se optó en esta etapa por centrar el análisis únicamente en el primer armónico del espectro de respuesta, como objetivo principal de este trabajo.

3.2 Evaluación de la Repetibilidad del Método

La repetibilidad del método se evaluó a partir del análisis de la dispersión estadística de dos parámetros obtenidos de la respuesta acústica ante múltiples impactos consecutivos:

- La estabilidad del valor de la frecuencia del primer armónico.
- El comportamiento temporal de la amplitud del mismo.

Ambos análisis se realizaron a partir 100 espectrogramas generados en Sonic Visualiser, como respuesta a 100 impactos consecutivos sobre una misma muestra. Estos datos se exportaron a una planilla de cálculo. En dicha planilla, cada fila representa una ventana temporal (una FFT) y cada columna un bin de frecuencia. Esta estructura permitió observar con detalle la evolución espectral de la señal a lo largo del tiempo.

De esta forma, se colorearon los valores máximos de cada fila (es decir, los de mayor amplitud por instante) para poder tener, además de valores de las amplitudes, una visualización gráfica del valor de la frecuencia fundamental, todo a lo largo del tiempo. A modo de ejemplo, la Figura 7 muestra este resultado para tres impactos consecutivos.

Para estudiar el primer parámetro -la estabilidad del valor de la frecuencia del primer armónico-, se observó primeramente qué columnas se coloreaban con los máximos. Se esperaba encontrar cierto grado de variación entre impactos, que permitiría representar la dispersión de los resultados. Sin embargo, con la resolución espectral utilizada, el 100 % de los valores se concentraron en apenas dos bins contiguos, lo que indica que no fue posible construir una distribución estadística útil dentro de esos parámetros. En la Figura 7 citada, puede observarse este hecho. Hay una marcada concentración de energía en el mismo bin de frecuencia.

Para analizar el segundo parámetro -el comportamiento temporal de la amplitud del primer armónico-, se tomaron las amplitudes correspondientes a los bins coloreados y se graficaron en función del tiempo. Las curvas obtenidas fueron normalizadas al valor pico para facilitar la comparación

entre impactos. Este análisis se realizó sobre las tres especies de madera estudiadas.

La Figura 8 muestra los resultados obtenidos para tres golpes consecutivos. Si bien se observaron pequeñas variaciones entre impactos, estas fueron considerablemente menores en comparación con las diferencias entre especies. Esta coincidencia en las curvas de decaimiento temporal obtenidas refuerza la confiabilidad del método propuesto y su potencial para caracterizar comparativamente diferentes materiales de forma objetiva y reproducible.

Cabe destacar que los extremos temporales (inicio y fin) de cada impacto corresponden a transitorios fuera del estado estacionario, por lo que fueron descartados para la determinación del valor de la frecuencia fundamental.

Finalmente, para alinear temporalmente los gráficos, se ubicó el valor máximo de amplitud y se tomó como origen de tiempo $t = 0$ a la muestra -12 (es decir, 12 muestras anteriores al pico). La longitud total de la ventana analizada fue de 80 muestras, lo que representa un intervalo de 3,41 s, con el pico centrado en el instante 0,51 s.

3.3 Influencia del Tipo de Sujeción sobre la Respuesta del Primer Armónico

La forma en que se sujeta la muestra durante el impacto influye notablemente sobre su comportamiento vibratorio, afectando tanto la frecuencia fundamental como el decaimiento temporal del primer armónico.

En las maderas homogéneas (Abeto Alemán y Pino Brasil), se observó una relación entre el nivel de restricción mecánica y la frecuencia de resonancia: al variar los puntos de anclaje varía la frecuencia fundamental obtenida.

Además, el tipo de sujeción también incidió en el comportamiento temporal de la vibración. Las configuraciones más restrictivas, como la C (sujeción en cuatro puntos), generaron un amortiguamiento más rápido, mientras que la D (suspensión sobre bandas elásticas) permitió una mayor persistencia de la vibración.

Este efecto es coherente con la influencia de las condiciones de frontera sobre los modos naturales de vibración: cuando los puntos de sujeción coinciden con nodos de desplazamiento mínimo, su impacto es menor; en cambio, si coinciden con antinodos, restringen considerablemente la respuesta dinámica.

La Figura 9 muestra la evolución temporal del primer armónico en las tres maderas y bajo las cuatro configuraciones de sujeción, integrando tanto la variación en frecuencia como el comportamiento del decaimiento temporal.

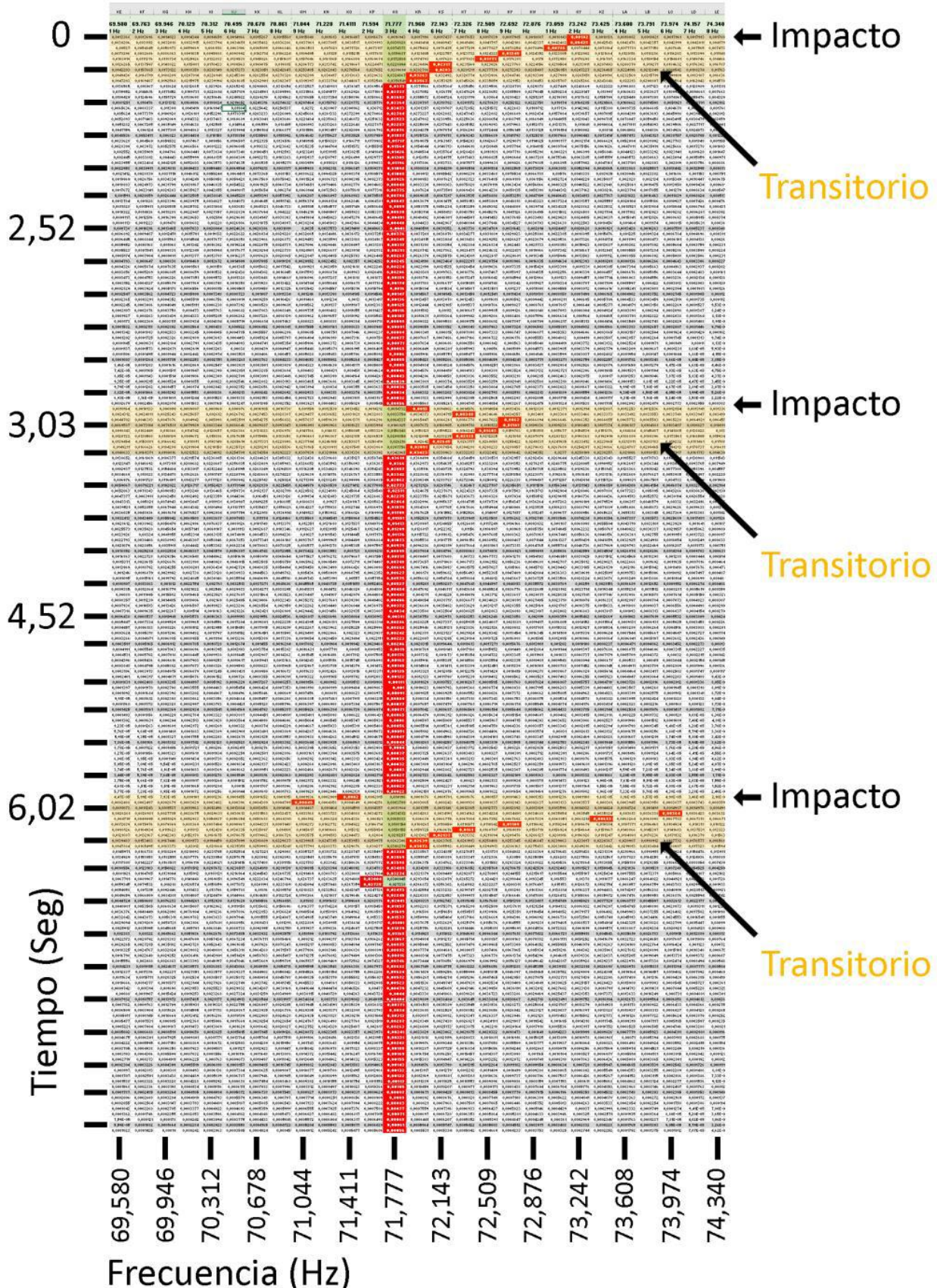


Figura 7. Coloreado de bins máximos en el espectrograma temporal de tres impactos consecutivos.

La evidencia sugiere que el tipo de sujeción no solo modifica los valores de frecuencia y amortiguamiento, sino que también puede alterar la definición espectral de los modos superiores. Por tal motivo, la configuración D fue seleccionada como estándar para las comparaciones entre especies. Esta elección se basó en su capacidad para ofrecer una sujeción estable pero mínimamente invasiva, reduciendo al máximo las

interferencias mecánicas que pudieran alterar los modos naturales de vibración. Además, su diseño permitió una alta repetibilidad entre impactos, tanto en frecuencia como en comportamiento temporal, lo que la convierte en una condición de referencia confiable para caracterizar comparativamente distintos tipos de madera

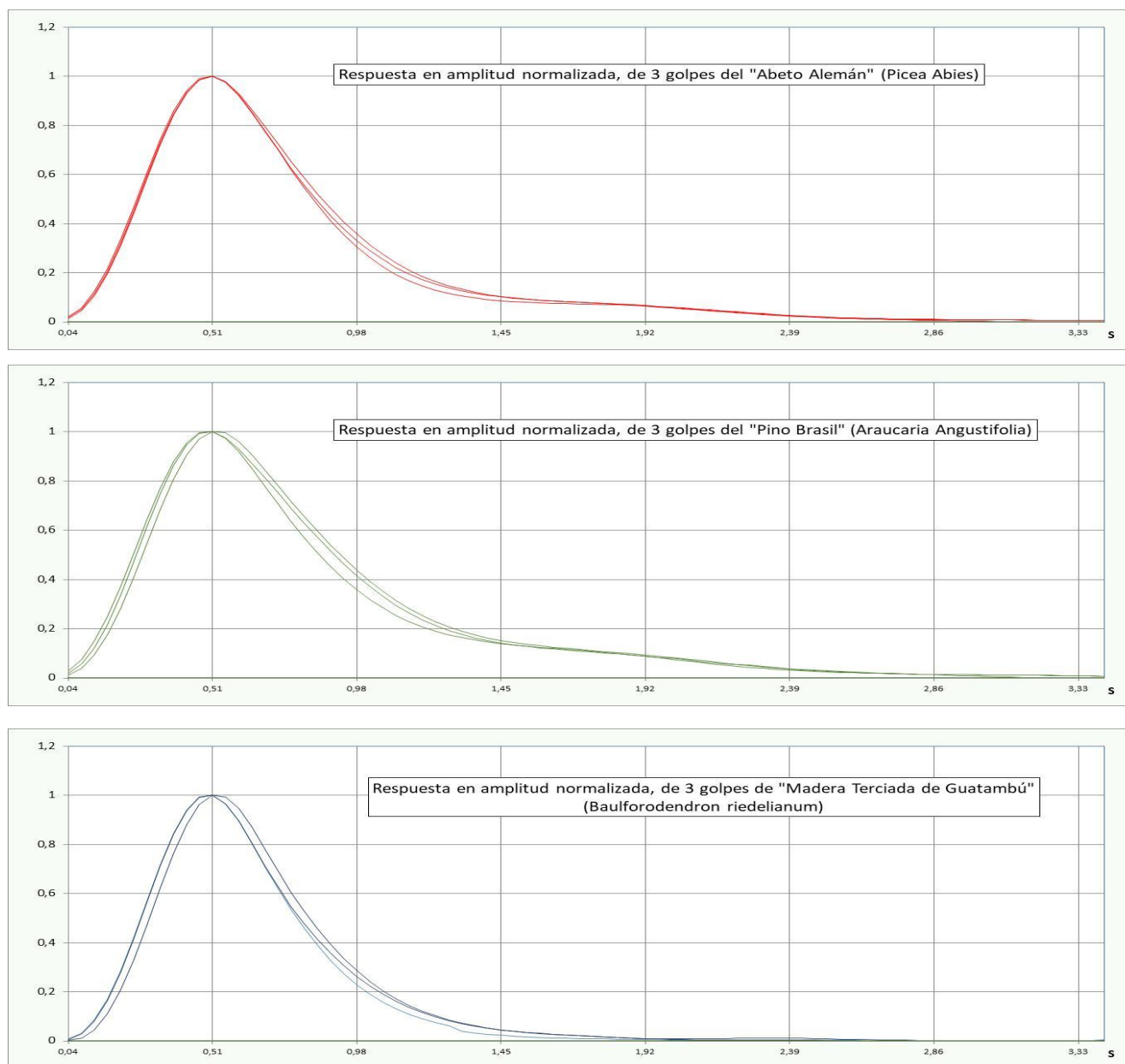


Figura 8. Variación entre 3 golpes para un mismo tipo de sujeción

3.4 Variación de Frecuencia fundamental y análisis temporal en cada configuración

Para cada una de las maderas ensayadas, se realizó un análisis detallado de la evolución temporal del primer armónico ante un impacto, por el método mencionado en la sección 2.2.3. Las muestras fueron evaluadas bajo las cuatro configuraciones de sujeción. Como se mencionó, la amplitud fue normalizada al pico

máximo, en las 3 maderas y en los 4 casos de sujeción, para permitir la comparación. En los gráficos temporales (ver Figura 9) se aprecia cómo varía la amplitud de vibración en el tiempo, revelando diferencias en la tasa de amortiguamiento según la forma en que la muestra es soportada. Por su parte, los gráficos de barra indican cómo se modifica la frecuencia del primer armónico (en Hz.) para cada condición de sujeción.

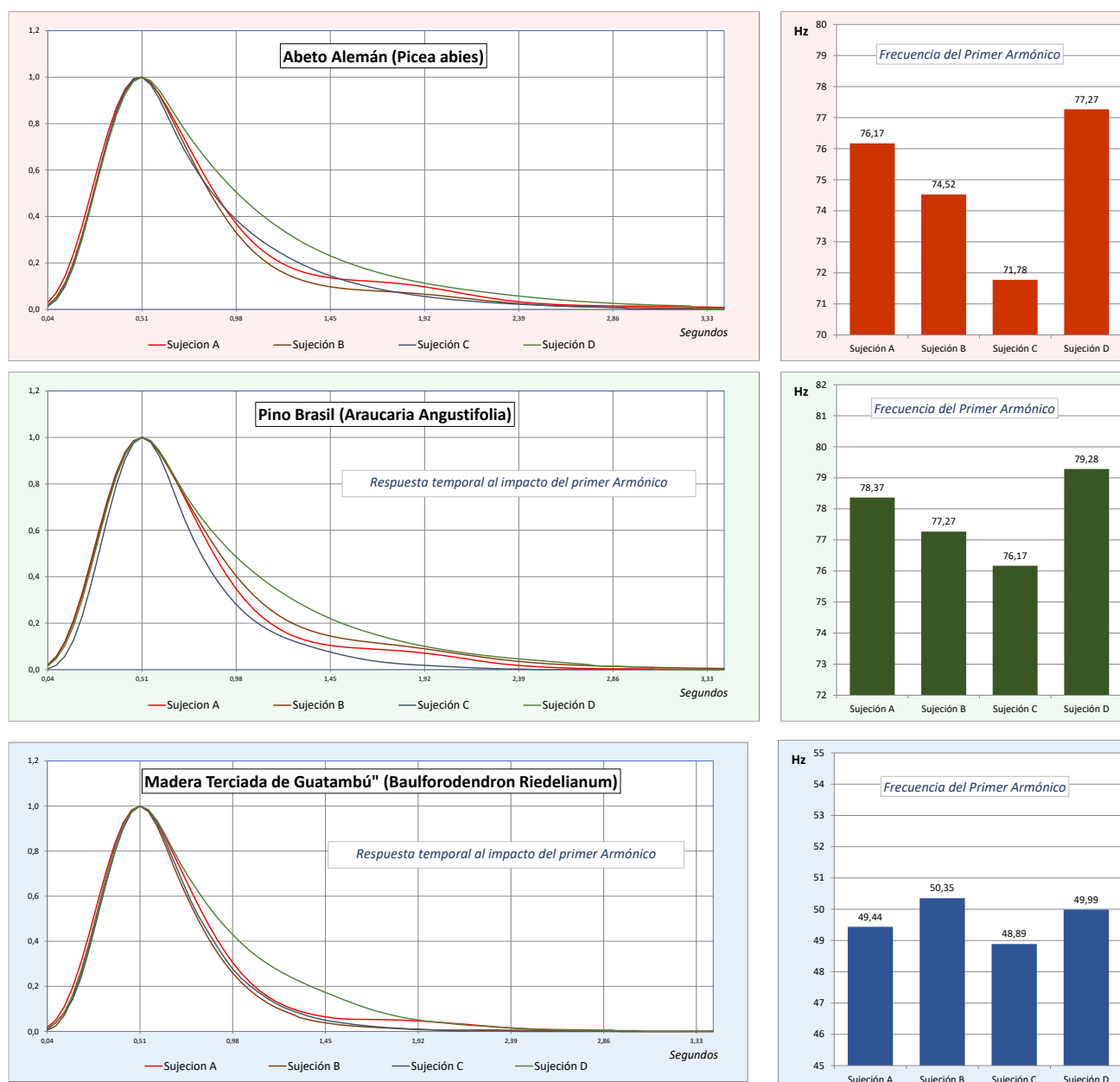


Figura 9. Evolución temporal del primer armónico en las 3 maderas y los 4 tipos de sujeción

De los gráficos, se puede observar lo siguiente:

Abeto Alemán (*Picea abies*)

La frecuencia varía levemente entre configuraciones, con un mínimo en la sujeción C (71,78 Hz) y un máximo en la sujeción D (77,27 Hz). Las curvas de decaimiento presentan diferencias sutiles, pero consistentes, indicando que el tipo de sujeción afecta principalmente la duración de la vibración más que su frecuencia.

Pino Brasil (*Araucaria angustifolia*)

Se observa un comportamiento similar al del abeto, con frecuencias cercanas entre sí (de 76,17 Hz a 79,28 Hz), aunque con mayor amplitud general. Las curvas

muestran una caída más suave en la sujeción D, lo que sugiere una menor amortiguación en esta condición.

Madera Terciada de Guatambú (*Balfourodendron riedelianum*)

A diferencia de las anteriores, esta madera muestra frecuencias más bajas (alrededor de 49 50 Hz), como era esperable por su estructura compuesta y mayor densidad. Las curvas de respuesta tienen un decaimiento más rápido, con menor energía vibratoria sostenida, indicando una capacidad resonante inferior en comparación con las otras maderas.

En cuanto a la forma de sujeción, se puede observar que:

- **Sujeción de Cuatro Puntos en Disposición Horizontal**

Al sujetar la madera en cuatro puntos, se introducen restricciones mecánicas significativas, limitando la amplitud de vibración en varias regiones. Dependiendo de la ubicación exacta de los puntos de sujeción con respecto a los nodos de resonancia, el efecto de la restricción puede ser más o menos severo. Si los puntos de sujeción coinciden con nodos de desplazamiento mínimo, la alteración será menor; si coinciden con antinodos (zonas de máximo desplazamiento), la restricción será más fuerte y la reducción de la frecuencia fundamental será mayor.

- **Dos Puntos en Disposición Vertical**

En esta configuración, la madera tiene una menor restricción en comparación con la disposición de cuatro puntos, lo que permite una mayor flexibilidad en ciertos modos de vibración.

- **Un Punto en Disposición Vertical**

Al suspender la madera de un solo punto, la restricción de movimiento es moderada en términos de la estructura mecánica global. La madera conserva cierta capacidad para oscilar alrededor del punto de suspensión.

- **Bandas Elásticas (análisis válido solo para madera homogénea)**

Finalmente, cuando la madera se encuentra apoyada sobre bandas elásticas, la restricción mecánica es mínima y la pieza conserva una alta capacidad para vibrar libremente en sus modos naturales.

Este análisis demostró que la forma de sujeción incide de manera notable en la dinámica vibratoria. La evidencia sugiere que la configuración D ofrece condiciones cercanas a las ideales: mínima interferencia mecánica, buena repetibilidad entre impactos, y una representación fiel de los modos propios de la muestra. Por ello, fue adoptada como estándar para las comparaciones entre especies. Su mínima interferencia mecánica y alta repetibilidad entre impactos la convierten en una condición de referencia confiable para realizar comparaciones objetivas.

3.5 Comparación entre las especies estudiadas

En la Figura 10 se compara la respuesta normalizada del primer armónico de tres tipos de madera (Abeto Alemán, Pino Brasil y Terciado) ensayadas bajo la configuración de soporte tipo "D", es decir, suspendidas sobre bandas elásticas. Como se dijo en el punto anterior, esta configuración fue elegida como estándar por su simplicidad y porque ofrece mínima restricción mecánica, lo que permite que la madera vibre de forma más libre y reproducible.

Las respuestas impulsivas fueron normalizadas en amplitud y sincronizadas en el tiempo, de modo que los picos máximos coincidan. Esto permite concentrarnos en la forma de decaimiento del primer armónico sin que interfirieran diferencias en niveles o en tiempo de impacto. Así, se puede evaluar cómo se comporta cada madera al vibrar: cuánto tiempo sostiene la energía y cómo se atenúa.

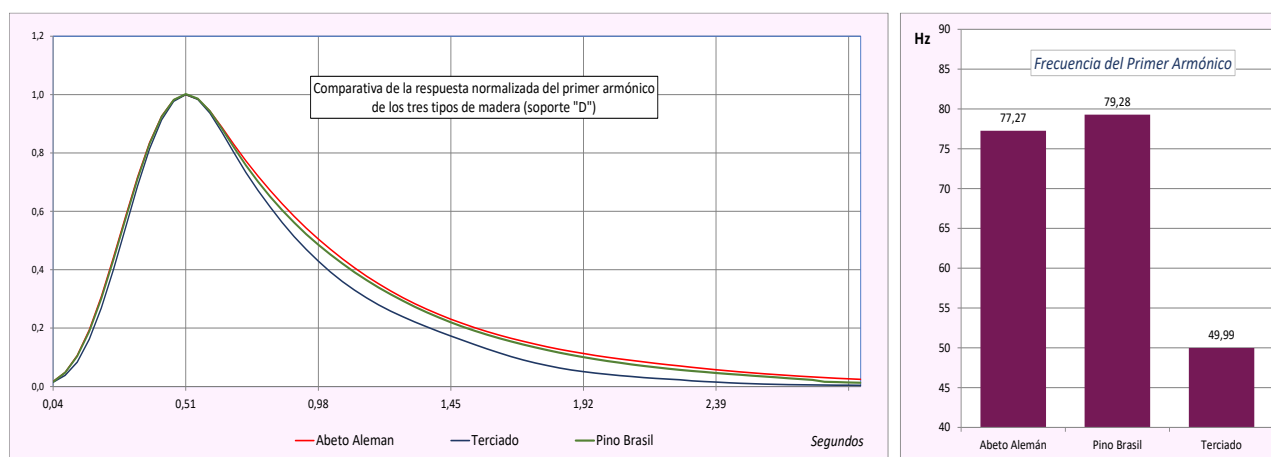


Figura 10. Comparación de la respuesta de los tres tipos de madera con sujeción "D"

El Abeto Alemán, usado como referencia, muestra una caída más lenta, lo que sugiere un coeficiente de amortiguamiento bajo (mayor capacidad de mantener la vibración en el tiempo).

El Pino Brasil tiene un comportamiento similar, con una atenuación levemente más rápida, y el Terciado se

distingue por una caída abrupta, lo que indica una rápida disipación de la energía vibratoria.

A la derecha, el gráfico de barras muestra la frecuencia del primer armónico para cada madera. El Pino Brasil alcanza la frecuencia más alta (79,28 Hz), seguido por el Abeto (77,27 Hz) y finalmente el Terciado (49,99 Hz).

Hz), confirmando diferencias en rigidez y comportamiento acústico.

Es evidente que el abeto (*Picea abies*) tiene las propiedades más interesantes para la tapa armónica de instrumentos musicales, alta elasticidad, baja densidad y baja fricción interna (Voichita Bucur et al., 2016).

4 DISCUSIÓN

Este método de respuesta impulsiva permite comparar especies de madera bajo condiciones reproducibles.

La configuración de sujeción D es preferible por minimizar restricciones mecánicas. El decaimiento temporal y la frecuencia del primer armónico emergen como indicadores útiles para caracterización de las muestras.

Es importante recordar que este trabajo no busca calificar la calidad de las maderas, sino que se centra en el desarrollo y validación de una metodología experimental objetiva y replicable para poder caracterizarlas y determinar diferencias y similitudes entre ellas.

Además, en esta etapa solo se ha evaluado el comportamiento del primer armónico, pero el objetivo futuro es extender el análisis a los modos superiores, optimizar el procedimiento de medición y lograr que el método pueda ser reproducido en diferentes laboratorios bajo condiciones similares.

Si bien este trabajo no analiza variaciones intraespecíficas (como orientación de corte dentro de un mismo tronco), el método podría adaptarse para ese tipo de estudios. Se recomienda ampliar el número de muestras y considerar estadísticas (media, desviación estándar, coeficiente de variación) para robustecer resultados.

5 CONCLUSIONES

El desarrollo de esta metodología representa un avance significativo en la evaluación objetiva de materiales para la luthería. Su aplicación permite caracterizar tanto las propiedades acústicas como las mecánicas de diferentes maderas bajo condiciones controladas. Futuras investigaciones podrán aprovechar este marco para identificar materiales alternativos y optimizar el diseño de instrumentos musicales.

Las principales conclusiones que se derivan son:

El método de respuesta impulsiva permite distinguir especies por su comportamiento vibratorio.

La configuración de sujeción influye significativamente en las frecuencias y decaimientos observados.

La configuración suspendida en bandas elásticas resultó óptima para comparaciones.

La frecuencia del primer armónico y su duración son buenos indicadores de la capacidad resonante.

El análisis muestra que el abeto alemán ofrece la mejor respuesta, seguido por el pino Brasil. El terciado presenta menor aptitud acústica, como era esperable.

PROYECCIONES FUTURAS

- Extender el análisis a armónicos superiores.
- Incorporar estadísticas robustas en los resultados.
- Evaluar la discriminación entre cortes distintos de una misma especie.
- Explorar otras especies nativas con potencial en luthería.
- Mejoras en el aparejo de impacto.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Laboratorio de Acústica y Luminotecnia de la CIC por facilitar las instalaciones. A la Facultad de Ingeniería de la UNLP por el soporte técnico y logístico brindado.

Al Luthier Alejandro Donnantuoni por su generosa colaboración en el acondicionamiento de las muestras.

Al Luthier Julio Malarino por el intercambio de ideas, su permanente aliento y su generosa colaboración al facilitarnos las tablas de Pino Abeto.

Al INTA EEA y al Ing. Ftal. Hugo Fassola por su gestión para la obtención de las muestras de Araucaria y Pino Resinoso. A la Dra. Rosa Angela Winck y el Tec. en Ind. de la Madera Diego Aquino, por parte de Pindó SA el Dr. Rafael Scherer, el Ing. Ind. Fabian Preusles y la Ing. Ftal. Lilian Ayala.

REFERENCIAS

- Iris Brémaud (2013). Acoustical properties of wood in string instruments soundboards and tuned idiophones: Biological and cultural diversity. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00808347>
- Richard Mark French (2008). Engineering the Guitar. Purdue University Department of Mechanical Engineering Technology Knoy Hall of Technology West Lafayette, IN 47907-2021 ISBN: 978-0-387-74368-4 e-ISBN: 978-0-387-74369-1 DOI: 10.1007/978-0-387-74369-1
- Voichita Bucur (2016). Handbook of Materials for String Musical Instruments. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-32080-9>