

CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DEL MATERIAL UTILIZADO EN LA  
FABRICACIÓN DE LA TAPA DE LA GUITARRA ESPAÑOLA: INFLUENCIA EN LA  
SONORIDAD

ENNIO HUGO IDROBO ÁVILA

UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA  
INGENIERIA FÍSICA  
POPAYÁN  
2013

CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DEL MATERIAL UTILIZADO EN LA  
FABRICACIÓN DE LA TAPA DE LA GUITARRA ESPAÑOLA: INFLUENCIA EN LA  
SONORIDAD

ENNIO HUGO IDROBO ÁVILA

TRABAJO DE GRADO EN LA MODALIDAD DE INVESTIGACIÓN PRESENTADO  
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO FÍSICO

DIRECTOR:  
RUBIEL VARGAS CAÑAS PH. D.

UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA  
INGENIERIA FÍSICA  
POPAYÁN  
2013

Nota de aceptación

Aprobado

Director



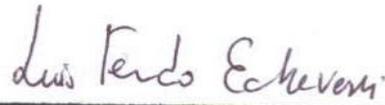
RUBIEL VARGAS CAÑAS PH. D.

Jurado



LEÓN VAN NOORDEN PH. D.

Jurado



LUIS F. ECHEVERRI Ms. C.

Fecha de sustentación: 12 de noviembre de 2013.

*Este trabajo está dedicado a mi familia, fuente y cimientos de todo mi ser, a mis amigos que como hermanos han acompañado mi caminar, a mis grandes profesores, que como verdaderos maestros han compartido con humildad y respeto sus experiencias y conocimientos, contribuyendo así a mi formación como una persona integral, y finalmente a todos los apasionados por la física, la guitarra y la música.*

*Ennio H. Idrobo A.*

## **PÁGINA DE AGRADECIMIENTOS**

El presente trabajo no se hubiese podido realizar sin la ayuda de muchas personas; inicialmente el director Rubiel Vargas que mostró su interés en el tema y siempre confió en mí y me apoyó durante el desarrollo del trabajo, el Grupo de Óptica y Láser de la Universidad del Cauca, quienes me prestaron su laboratorio y me acogieron como parte del grupo, la emisora de la Universidad del Cauca, en donde se realizaron algunas pruebas de sonido, el Luthier Jorge Noguera que además de compartir sus conocimientos y experiencias con su vasta humildad, me facilitó sus guitarras y su taller para realizar la toma de muestras de sonido y vibración, mi amigo Jose Luis Zúñiga que me ayudó en la toma de las muestras en la ciudad de Cali, mis amigos Camilo y Sebastián Torres Hernández quienes confiaron en mí y me prestaron sus preciadas guitarras (Alvaro y Yamaha), las personas encargadas de los laboratorios del departamento de Física de la Universidad del Cauca, quienes siempre estuvieron dispuestas a colaborar, el Luthier Juan Ernesto Tusil Vivas quien compartió conmigo sus conocimientos y además me colaboró en la construcción de material para los experimentos, el profesor Luis Vargas que siempre me apoyó y estuvo interesado en el tema, y finalmente los jurados León Van Noorden y Luis Fernando Echeverri.

A todas las personas que he mencionado quiero manifestarles mi agradecimiento sincero y mi profundo respeto y admiración.

Ennio H. Idrobo A.



# **CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DEL MATERIAL UTILIZADO EN LA FABRICACIÓN DE LA TAPA DE LA GUITARRA ESPAÑOLA: INFLUENCIA EN LA SONORIDAD**

## **CONTENIDO**

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1: LA GUITARRA ESPAÑOLA .....	4
1.1. Partes de la guitarra.....	4
1.2. Características sonoras de una guitarra de concierto .....	5
1.3. Aspectos que influyen en el sonido de la guitarra.....	6
1.4. La Madera .....	7
1.4.1. Propiedades físicas de la madera.....	8
1.4.2. Propiedades mecánicas y acústicas de las maderas .....	9
1.4.3. Tipos de maderas para la construcción de guitarras .....	10
CAPÍTULO 2: FÍSICA DEL SONIDO .....	11
2.1. Principios básicos del sonido .....	11
2.1.1. Nivel de presión sonora (SPL) .....	12
2.1.2. Potencia sonora .....	13
2.1.3. Frecuencia del sonido .....	14
2.2. Resonancia .....	14
2.3. Características del sonido .....	16
2.3.1. Timbre .....	16
2.3.2. Tono .....	16
2.3.3. Intensidad .....	16
2.4. Representación del sonido.....	17
2.4.1. Representación frecuencial: sonido y espectro .....	17
2.4.2. Representación temporal: Oscilograma .....	19
2.5. Superposición y ondas estacionarias.....	20
CAPÍTULO 3: ANÁLISIS ACÚSTICO .....	22
3.1. Procesamiento de señales .....	22
3.2. Energía y potencia de una señal .....	23
3.3. Recolección de datos y metodología .....	24

3.3.1. Población y Muestra .....	25
3.3.2. Análisis de Datos .....	25
3.4. Discusión .....	35
CAPÍTULO 4: CORRELACIÓN ENTRE EL SONIDO Y LAS VIBRACIONES DE LA TAPA.....	37
4.1. Vibración .....	37
4.1.1. Ondas transversales en cuerdas .....	37
4.1.2. Ecuación de onda de una membrana rectangular .....	41
4.1.3. Medición de Vibración .....	46
4.2. Análisis de vibraciones y sonido.....	47
4.2.1. Coeficiente de correlación lineal .....	47
4.3. Recolección de datos .....	48
4.4. Análisis de datos .....	51
4.5. Relación entre el tipo de material y el sonido .....	54
4.6. Discusión .....	57
CAPÍTULO 5: SIMULACIÓN .....	58
5.1. Estudio de vibraciones en elementos finitos .....	58
5.2. Simulación.....	59
5.3. Modos obtenidos experimentalmente con acelerómetros.....	67
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	70
6.1. Conclusiones .....	70
6.2. Trabajos futuros.....	71
BIBLIOGRAFÍA.....	72

## LISTA DE TABLAS

	Página	
Tabla.1.1.	Comparación entre las guitarras: clásica, flamenca y acústica.	3
Tabla.2.1.	Presión eficaz sonora y nivel de presión sonora para algunas fuentes sonoras, ambientes y situaciones acústicas típicas.	10
Tabla.3.1.	Energías totales del primer y segundo grupo de guitarras.	24
Tabla.3.2.	Regresión lineal de las curvas de Energía del primer y segundo grupo de guitarras.	26
Tabla.3.3.	Duración en segundos del sonido. 95% de la Energía total para el primer y segundo grupo.	26
Tabla.3.4.	Regresión lineal de las curvas de Tiempo del primer y segundo grupo de guitarras.	29
Tabla.3.5.	Armónicos y número de armónicos presentes en los espectros de la nota E3 de las guitarras del primer y segundo grupo de guitarras.	31
Tabla.3.6.	Guitarras del primer y segundo grupo y su correspondiente total de armónicos: Número de armónicos presentes en las respectivas notas.	32
Tabla.4.1.	Correlación para todas las notas de cada guitarra del primer y segundo grupo.	51
Tabla.4.2.	Propiedades físicas de las maderas cedro canadiense y pino abeto alemán.	52
Tabla.4.3.	Vectores de entrada al sistema (propiedades físicas de las maderas).	53
Tabla.4.4.	Vectores de salida (respuesta del sistema).	53
Tabla.4.5.	Coeficientes de correlación para las guitarras del primer y segundo grupo.	53
Tabla.5.1.	Propiedades de materiales utilizados en la primera fase de la simulación.	57
Tabla.5.2.	Propiedades de los materiales utilizados en la segunda fase de la simulación.	58
Tabla.5.3.	Desplazamientos máximos en $mm * 10^{-2}$ en los diferentes modos.	58
Tabla.5.4.	Modos de resonancia obtenidos a partir de la simulación considerando cambios en la razón de Poisson.	59
Tabla.5.5.	Frecuencias en Hz en los diferentes modos.	60

## LISTA DE FIGURAS

		Página
Figura.0.1.	Partes importantes en la producción del sonido en la guitarra: la caja de resonancia y la tapa con su sistema de armónicos.	VIII
Figura.1.1.	Partes de la guitarra.	1
Figura.1.2.	Estructura de los filamentos de celulosa en la madera.	4
Figura.1.3.	Estructura celular en a) madera blanda y b) madera dura.	6
Figura.2.1.	Evolución de la presión sonora total $P_T$ en función del tiempo en un punto cualquiera del espacio.	9
Figura.2.2.	Respuesta en frecuencia de la tapa, Potencia Sonora.	12
Figura.2.3.	Resonador de Helmholtz.	12
Figura.2.4.	Descripción musical y acústica de una nota o tono.	15
Figura.2.5.	Descripción musical y acústica de una nota real.	16
Figura.2.6.	Historia temporal y espectro de un tono simple, y un tono real con cuatro armónicos del mismo nivel.	16
Figura.2.7.	Oscilograma y espectrograma de un tono, desde su inicio transitorio (ataque) hasta su final transitorio (decaimiento).	17
Figura.3.1.	Señales correspondientes a la nota E3 para cada guitarra a) del primer grupo, y b) del segundo grupo.	23
Figura.3.2.	Energía total promedio vs Frecuencia, a) para el primer grupo de guitarras, y b) para el segundo grupo de guitarras.	25
Figura.3.3.	Tiempo promedio vs Frecuencia, para a) el primer grupo, y b) el segundo grupo de guitarras.	28
Figura.3.4.	Espectros de frecuencia correspondientes a la nota E3 para cada guitarra a) del primer grupo y b) del segundo grupo.	30
Figura.3.5.	Efecto de filtrado de la señal original (dada por la cuerda) por parte de la tapa y el cuerpo de la guitarra.	33
Figura.4.1.	(a) Cuerda fuertemente tensa entre dos puntos fijos. (b) Desplazamiento de la cuerda en el tiempo $t = 0$ .	34
Figura.4.2.	Forma de la cuerda adquirida en el tiempo $t$ .	35
Figura.4.3.	Elemento de cuerda de longitud $\Delta s$ entre $x$ y $x + \Delta x$ .	35
Figura.4.4.	Cuatro primeros modos de vibración en una cuerda.	38
Figura.4.5.	Vibración de la cuerda: superposición de todos los armónicos.	38
Figura.4.6.	Fuerzas sobre un elemento de membrana rectangular.	39
Figura.4.7.	Algunos modos normales de una membrana rectangular.	42
Figura.4.8.	Sistema de Monitoreo y Control de Vibración en Computadora, a través de Transductores, Acondicionamiento de Señal y una tarjeta de Adquisición de datos.	43
Figura.4.9.	Servomotor utilizado y su ubicación en el montaje experimental.	45
Figura.4.10.	Acelerómetro MMA7361.	46
Figura.4.11.	Plantilla utilizada para la proyección en las pruebas de vibración.	46
Figura.4.12.	a) Montaje general utilizado en las pruebas de vibración. b) Proyección realizada sobre la guitarra Alhambra.	47
Figura.4.13.	Arduino Uno utilizado como tarjeta de adquisición.	48
Figura.4.14.	Señales de vibración y sonido y sus respectivas sumas acumulativas de sus energías para la nota E3 a) en la guitarra Cedrol, y b) en la guitarra Alhambra.	49

Figura.4.15.	Correlación cruzada normalizada y coeficientes de correlación de las sumas acumulativas de las señales de sonido y vibración para la nota E3 a) en la guitarra Cedro1, y b) en la guitarra Alhambra.	50
Figura.4.16.	Esquema general de la visualización del sistema con sus entradas y salidas.	52
Figura.5.1.	Módulo de Poisson vs. Desplazamiento para el modo 1.	60
Figura.5.2.	Módulo de Poisson vs. Desplazamiento para el modo 2.	61
Figura.5.3.	Módulo de Poisson vs. Desplazamiento para el modo 3.	61
Figura.5.4.	Módulo de Poisson vs. Desplazamiento para el modo 4.	62
Figura.5.5.	Módulo de Poisson vs. Desplazamiento para el modo 5.	62
Figura.5.6.	Módulo de Poisson vs. Desplazamiento para el modo 6.	63
Figura.5.7.	Módulo de Poisson vs. Desplazamiento para el modo 7.	63
Figura.5.8.	Excitación de la tapa de la guitarra Cedro1 para la nota E3.	64
Figura.5.9.	Excitación de la tapa de la guitarra Pino para la nota E4.	65
Figura.5.10.	Excitación de la tapa de la guitarra Cedro2 para la nota E3.	65

## ANEXOS

		Página
ANEXO I	ESTRUCTURA DE LA MADERA	1
ANEXO II	FILTROS EN EL PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES	4
ANEXO III	ANÁLISIS ACÚSTICO	7
ANEXO IV	VIBRACIONES DE LAS CUERDAS EN INSTRUMENTOS DE CUERDA PULSADA	17
ANEXO V	ANÁLISIS DE VIBRACIONES Y SONIDO	22

# **CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DEL MATERIAL UTILIZADO EN LA FABRICACIÓN DE LA TAPA DE LA GUITARRA ESPAÑOLA: INFLUENCIA EN LA SONORIDAD**

## **RESUMEN**

En el presente trabajo se muestra un estudio a los materiales más utilizados en la construcción de la tapa armónica de la guitarra y su relación con algunas características del sonido, como timbre, volumen, y duración. Así, se analiza las propiedades físicas de las maderas pino abeto alemán y cedro canadiense y su influencia en la calidad sonora de la guitarra. Para ello se utiliza como soporte teórico la física del sonido y de las vibraciones en membranas, el procesamiento digital de señales y el método de elementos finitos. Con esta base se desarrolla un análisis acústico y vibracional, y una simulación por el método de elementos finitos. Finalmente se encuentra algunas relaciones entre las propiedades físicas de los materiales, las vibraciones, y las características del sonido antes mencionadas.

## **PALABRAS CLAVES**

Timbre, volumen, duración, procesamiento digital de señales, método de elementos finitos.

## **ABSTRACT**

This thesis presents a study to relate the most commonly used materials for constructing the top plate of the guitar and some sound characteristics, such as timbre, volume, and sound duration. There were analysed the physical properties of German spruce wood and Canadian cedar wood and their influence on the sound quality of the guitar. Theoretically, the wood influences the physics of the sound and the vibrations in the membranes. Relationships were investigated using digital signal processing and finite element analysis. Based upon this study acoustic and vibrational analyses were developed and a simulation with the finite element analysis performed. It explained the relationships between the physical properties of the materials, the vibrations, and the above mentioned sound characteristics.

## **KEY WORDS**

Timbre, volume, duration, digital signal processing, finite element method.

## INTRODUCCIÓN

La guitarra ha sido un instrumento que ha evolucionado en las distintas épocas, adaptándose a las necesidades musicales. Sin embargo, desde finales del siglo XIX se establecieron los criterios estándar de las guitarras clásicas [1]: se alargó el cuerpo, al mismo tiempo se conservó una escotadura bien marcada, se utilizaron materiales más ligeros y cajas más finas, se instauró (mediante un proceso empírico) un sistema de medidas y proporciones basado en una cierta lógica geométrica, y además se implementó y estandarizó el sistema de baretaje también llamado sistema de costillas o armónicos el cual se muestra en la Figura.0.1.; desde entonces, la guitarra no ha tenido una evolución considerable que le permita adaptarse con éxito a las exigencias de la actualidad [1]. Hoy en día, debido al aumento de las dimensiones de los recintos donde se celebran conciertos de guitarra, así como las obras donde ésta es el instrumento solista, el instrumentista y el espectador requieren una guitarra con una mayor potencia sonora (volumen), una mayor duración en el sonido, una alta homogeneidad entre los registros grave, medio y agudo (asociados a tonos bajos, medios y altos, respectivamente), y un timbre cálido y puro.



Figura.0.1. Partes importantes en la producción del sonido en la guitarra: la caja de resonancia y la tapa con su sistema de armónicos.

La homogeneidad en los registros sonoros y una potencia considerable son características poco encontradas en las guitarras españolas, lo cual hace que la mayoría de conciertos se lleven a cabo con instrumentos que no satisfacen completamente las necesidades de un público exigente. Esta razón ha hecho que la guitarra pierda popularidad en el ámbito clásico comparada con otros instrumentos que, además de brindar conciertos con muy buena calidad sonora, tienen una historia de gran tradición y reconocimiento. Debido a esa

pérdida de popularidad, la aceptación de la guitarra por parte del público, y el poco reconocimiento por los compositores como un instrumento de gran calidad musical, la guitarra tiene y ha tenido muy poca relación con la música orquestal y la música sinfónica.

Además, aunque la tecnología ha tenido un gran avance en el aspecto de la amplificación del sonido, muchos de los guitarristas clásicos actuales prescinden de este elemento debido a razones como el realce de sonidos indeseados que inevitablemente se producen en la ejecución del instrumento y el costo de los equipos de amplificación, dado que se requieren dispositivos de alta calidad.

Desde hace algunos años se vienen realizando estudios sobre la acústica de diferentes instrumentos musicales. En el caso particular de la guitarra, los estudios tienen que ver con modelos matemáticos que describen su comportamiento acústico [2], simulación por el método de elementos finitos [3,4] y análisis por holografía [5]. Los estudios de modelado y simulación han arrojado buenos resultados que han ayudado a comprender un poco más el comportamiento del sonido en la guitarra; pero se han quedado cortos en cuanto a los materiales y su influencia en el sonido. La simulación por el Método de Elementos Finitos se ha enfocado en reproducir los resultados obtenidos experimentalmente, lográndose una buena aproximación entre el comportamiento “real” y la simulación. Sin embargo se debe considerar que el Método de Elementos Finitos trabaja con aproximaciones para poder resolver las ecuaciones de movimiento que describen el sistema, de esta manera siempre se tendrán errores en las predicciones que se realicen a través de él, y la magnitud de este error dependerá de la calibración de la simulación misma. Por otro lado, el estudio por holografía ha permitido visualizar de forma directa los modos de vibración en la tapa armónica del instrumento y cuantificar, con gran precisión, sus vibraciones. Como desventaja en ésta técnica se tiene el hecho de que se requiere de un buen equipo de laboratorio, aislado de perturbaciones externas que puedan afectar al sistema.

En este trabajo se analiza las propiedades físicas de dos de los materiales más utilizados en la fabricación de la tapa de la guitarra española (pino abeto alemán y cedro canadiense) y la influencia en su calidad sonora (homogeneidad en sus registros, potencia sonora, y timbre); se identifica, utilizando técnicas de tratamiento digital de señales, los modos de vibración de la tapa de la guitarra y su amplitud de vibración en relación con el material utilizado; se determina las características acústicas de guitarras con tapa armónica de pino abeto alemán y cedro canadiense; y finalmente se establece la influencia que tiene la densidad de las maderas en algunas de las cualidades sonoras de la guitarra como el timbre, la potencia sonora y la homogeneidad entre sus registros. Esto se realiza analizando las notas E3, E4, E5 y E6\*.

De esta manera, este trabajo busca responder la pregunta:

¿Qué influencia tiene el material de la tapa de la guitarra en su calidad acústica (homogeneidad, potencia sonora, sonido puro) de acuerdo con los requerimientos actuales?

---

\*Las notas E3, E4, E5 y E6 corresponden a las notas Mi de la sexta, cuarta y primera cuerda de la guitarra.

En este documento, primero se analizan las características sonoras de guitarras con tapas de pino abeto alemán y cedro canadiense por medio de un programa implementado en Matlab, y que a través del procesamiento digital de señales, aplicado a muestras de audio tomadas de cada guitarra, se determina la duración, el número de armónicos presentes en cada sonido (timbre), y la potencia sonora (volumen).

En segunda instancia, se realiza un análisis vibracional en las mismas guitarras utilizadas en la etapa anterior; este análisis se realiza por medio de un programa implementado en Labview, en el cual se controla un servomotor para pulsar las cuerdas, un arreglo de seis acelerómetros que captura las vibraciones de la tapa, y un micrófono que capta el sonido. EL procesamiento de las señales capturadas se procesa a través de un programa desarrollado en Matlab.

En la etapa final se realiza una simulación por elementos finitos con el software Aurora z88<sup>†</sup>. Esta simulación se compara con resultados experimentales y teóricos tomados de la literatura.

---

<sup>†</sup>El programa Aurora z88 es un software libre desarrollado por un equipo de profesionales supervisados por el Professor Frank Rieg de la Universidad de Bayreuth, Alemania.

## CAPÍTULO 1: LA GUITARRA ESPAÑOLA

Inicialmente en España se utilizó la guitarra como instrumento acompañante para *bailaores* y *cantaores* flamencos, ocupando un segundo plano de importancia; luego el toque de la guitarra fue creciendo y paulatinamente fue reclamando su lugar como parte fundamental del acervo flamenco, tomando así un papel protagónico en ese género musical. De otra parte, la guitarra sólo tomó relevancia como instrumento de música clásica a partir del siglo XVIII [1]; sin embargo, en nuestros días, debido a sus limitaciones sonoras, la interacción entre éste instrumento y la orquesta sinfónica se produce con poca frecuencia, y aunque muchos compositores han escrito cierta variedad de obras para guitarra y orquesta, su ejecución se ve limitada y opacada debido al contraste sonoro entre ésta y los instrumentos que componen la orquesta sinfónica.

### 1.1. Partes de la guitarra

Cada parte de la guitarra tiene una función importante no sólo en la estructura del instrumento sino también en la producción del sonido. En la Figura.1.1. se ilustra algunas de las más importantes.



Figura.1.1. Partes de la guitarra.

- **Caja de resonancia.** La caja de resonancia está formada por dos tapas de igual forma (la tapa y el fondo) y dos piezas largas y angostas (los flancos o aros), que siguiendo el contorno de las tapas, se cierran por ambos extremos, con lo cual forman el volumen donde se amplifican los tenues sonidos que emiten las cuerdas al vibrar.

- **Tapa armónica (Tapa en la Figura.1.1.).** La tapa armónica es el principal elemento de la guitarra, pues a ella se transmiten las vibraciones de las cuerdas, mediante el puente, y la obligan a vibrar con la frecuencia correspondiente a la nota musical que se emite en determinado momento. La tapa al vibrar mueve el aire contenido en la caja de resonancia y hace posible la percepción del sonido amplificado. La tapa se compone de dos piezas unidas en el sentido longitudinal de la veta de la madera. En general, siempre que se mencione la palabra tapa, se hace referencia exclusivamente a la tapa armónica de la guitarra.
- **Puente.** El puente es una pieza de madera adherida a la tapa armónica y está situado aproximadamente en el tercio inferior de esta. Su función es sujetar las cuerdas y transmitir sus vibraciones a la tapa.
- **Fondo.** La función del fondo consiste en contener el volumen de aire y recibir el choque de las ondas sonoras para reflejarlo hacia afuera. Y aunque no sea su función principal el fondo también vibra.
- **Flancos o aros.** Los flancos o aros son dos piezas de la misma madera con los que está construido el fondo y que ayudan a cerrar la caja de resonancia.
- **Mástil o mango.** El mástil o mango es el brazo de la guitarra, donde se ubica el diapasón.
- **Diapasón.** El diapasón es la pieza sobre la cual se incrustan los trastes.
- **Cabeza.** Esta pieza es el soporte del clavijero, y éste a su vez de las cuerdas.

## 1.2. Características sonoras de una guitarra de concierto

Es difícil estandarizar una idea de una buena guitarra de concierto; pero en general se puede decir que se identifica porque [6]:

- Los sonidos perduran el mayor tiempo posible.
- El sonido es potente y nítido.
- El sonido es limpio en todas las cuerdas y en todos los trastes.
- Hay homogeneidad entre los registros graves, medios y agudos.
- El timbre es cálido y puro.
- En todas las cuerdas, y bajo cualquier grado de tensión de ellas, se cumplirá que pisando en el traste 12 se produce la octava respecto al sonido de la cuerda al aire\*.

---

\* En música se le llama octava al intervalo entre dos notas separadas por 12 semitonos, lo que equivale en física a dos tonos en el que la frecuencia fundamental de uno es el doble de la del otro.

- Se pueden ejecutar los armónicos correspondientes en los trastes 5, 7, 12 y 19 (armónicos naturales).
- Se busca una acción baja en las cuerdas; esto, aunque conlleva a una mejor afinación y mayor comodidad en la ejecución, implica pérdida en la potencia sonora. La acción baja de las cuerdas hace referencia a la distancia que separa la cuerda y la parte superior del traste número 12. Para guitarras clásicas se utiliza normalmente una distancia que varía entre 3 y 4.5 mm y para guitarras flamencas esta distancia puede ser menor o igual a 3 mm.

### 1.3. Aspectos que influyen en el sonido de la guitarra

Existen muchos factores que afectan el sonido de la guitarra, entre ellos se pueden citar:

- Forma del resonador (caja): la forma de la caja influye en el “color” del sonido; por ejemplo, una caja ancha produce un sonido “grave y dulce” y una caja estrecha produce un sonido “agudo y metálico”.
- Materiales: los materiales influyen en el timbre. Esto se puede observar así: en la guitarra flamenca, cuya caja está generalmente fabricada en ciprés español, se aprecia un sonido “metálico y chillón o agudo” a diferencia de la guitarra clásica que tiene un sonido “dulce y claro”, y en la cual la caja frecuentemente se fabrica en palosanto brasilero o de la India.
- Grosor de la madera: el grosor de la madera afecta tanto la resistencia mecánica del instrumento a la tensión como a la potencia sonora; debido a que una madera gruesa tiene menor capacidad de vibración que una delgada. Esto se observa muy a menudo en la tapa armónica.
- Tipos de cuerda: los diferentes tipos de cuerda y sus materiales cambian radicalmente el sonido, por ejemplo, una cuerda de acero produce un sonido “metálico” y una cuerda de nylon produce un sonido “dulce”.

Lo anterior se puede observar comparando las guitarras flamenca, clásica y acústica, como se muestra en la Tabla.1.1.

Tabla.1.1. Comparación entre las guitarras: clásica, flamenca y acústica.

Guitarra	Materiales			Forma	Sonido
	Tapa	Caja	Cuerdas		
<b>Clásica</b>	Pino abeto	Palosanto	Nylon	Caja ancha	Dulce, grave
<b>Flamenca</b>	Pino abeto	Ciprés	Nylon	Caja estrecha	Metálico, agudo
<b>Acústica</b> *	Sitka o adirondack	Palosanto	Acero	Caja ancha, cintura poco pronunciada	Metálico

\*En general, se refiere a los instrumentos acústicos como todos los instrumentos que no utilizan medios de amplificación implantados en ellos. Así, los tres tipos de guitarras mencionados en la tabla anterior se pueden clasificar dentro de este tipo de instrumentos; sin embargo, en este caso se hace referencia a la guitarra acústica: guitarra con cuerpo grande y cuerdas de acero, muy utilizada en bluegrass y música country.

## 1.4. La Madera

La madera se puede considerar como un complejo material compuesto reforzado con fibras, formado de largas celdas poliméricas tubulares, alineadas unidireccionalmente en una matriz polimérica. Los tubos poliméricos están compuestos de haces de fibras de celulosa parcialmente cristalinas, alineadas en diversos ángulos respecto a los ejes de los tubos. Ésta configuración proporciona excelentes propiedades a la tensión en dirección longitudinal.

La madera está formada por cuatro constituyentes principales:

- Celulosa
- Hemicelulosa
- Lignina
- Extractivos

La celulosa es un polímero termoplástico natural con un grado de polimerización de aproximadamente 10000; en donde el grado de polimerización corresponde al número de unidades que se repiten en una molécula grande. Las fibras de celulosa representan aproximadamente del 40 al 50 por ciento de la madera. En la Figura.1.2. se muestra la estructura química de la celulosa, donde ésta se repite dos veces.

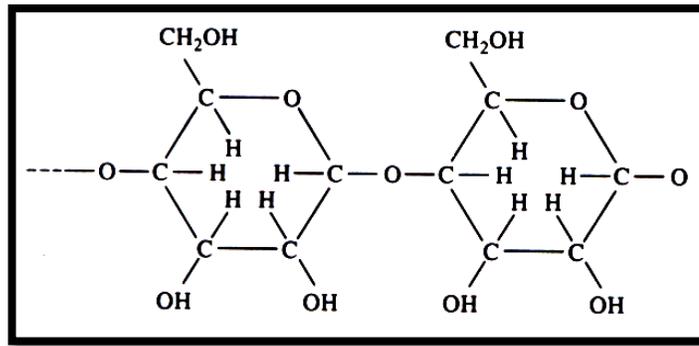


Figura.1.2.Estructura de los filamentos de celulosa en la madera.

La hemicelulosa es un polímero con un grado de polimerización de aproximadamente 200; aproximadamente del 25 al 35 por ciento de un árbol es hemicelulosa. Por su parte, la lignina es un aglutinante orgánico de bajo peso molecular, que une los diversos constituyentes de la madera; del 20 al 30 por ciento de un árbol está constituido por lignina. Finalmente, los extractivos son impurezas orgánicas como aceites, que proporcionan color a la madera o que actúan como preservativos contra el entorno y los insectos, y minerales inorgánicos, como la sílice. Los extractivos pueden representar hasta un 10 por ciento del total de la madera. [7]

### **1.4.1. Propiedades físicas de la madera**

Las propiedades físicas de la madera son aquellas que determinan su comportamiento frente a los distintos factores que intervienen en el medio natural, sin producir ninguna modificación mecánica o química.

#### **Anisotropía**

La madera está formada por diferentes tejidos que realizan diferentes funciones y que originan que su estructura no sea homogénea. Esta heterogeneidad se refleja en sus propiedades físicas y mecánicas, y es la causa de algunos de sus defectos y también de sus ventajas. Dicha heterogeneidad da lugar a lo que se conoce con el nombre de anisotropía, que es el diferente comportamiento de sus propiedades físicas y mecánicas según la dirección que se considere. Se establecen tres planos o direcciones principales: Longitudinal, Radial, y Tangencial.

Cuando se habla de las propiedades físicas se hace referencia a estas tres direcciones, y cuando se habla de las propiedades mecánicas sólo se habla de dos direcciones, la dirección paralela a las fibras (que coincide con la longitudinal) y la dirección perpendicular a las fibras (que engloba a la tangencial y radial, cuyas propiedades mecánicas suelen tener valores similares).

#### **Densidad**

La densidad de la madera se define como la relación entre su masa y su volumen, y es necesario referirla a un determinado contenido de humedad, generalmente el 12 %.

#### **Dureza**

Se define como la resistencia que opone la madera a la penetración de cuerpos extraños como ciertas herramientas, clavos, tornillos, etc. En la madera la dureza está relacionada con la densidad.

En general, la densidad de las maderas blandas tiende a ser inferior a la de las maderas duras debido a un mayor porcentaje de espacios huecos. La Figura.1.3. muestra la estructura celular de una madera blanda y una madera dura.

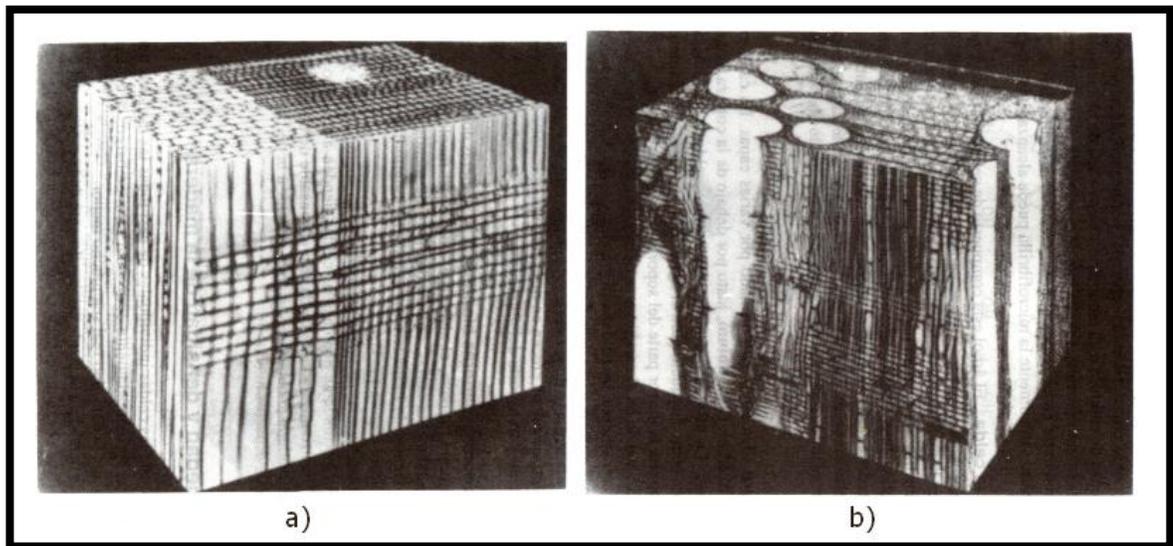


Figura.1.3. Estructura celular en a) madera blanda y b) madera dura. [7]

En el Anexo I se amplía la información sobre la estructura de la madera.

#### 1.4.2. Propiedades mecánicas y acústicas de las maderas

Desde el punto de vista estructural, la madera presenta una óptima relación peso/resistencia y debido a la anisotropía en su estructura, a la hora de definir sus propiedades mecánicas se consideran la dirección perpendicular y la dirección paralela a la fibra. En este hecho radica la principal diferencia de comportamiento frente a otros materiales. Las resistencias y módulos de elasticidad en la dirección paralela a la fibra son mucho más elevados que en la dirección perpendicular.

Por otro lado, la madera en general tiene tanto la capacidad de amortiguar las vibraciones sonoras como la de conducir eficientemente el sonido. Su estructura celular porosa transforma la energía sonora en calórica, debido al roce y resistencia viscosa del medio, evitando de esta forma transmitir vibraciones a grandes distancias. Pero también es un medio de buena transmisión del sonido, razón por la cual se utiliza para fabricar instrumentos musicales. Así, entre las propiedades acústicas de las maderas se encuentra la absorción y la transmisión del sonido. Los materiales absorbentes de sonido pueden ser de dos tipos, porosos y paneles resonantes. Los paneles de madera maciza o los tableros derivados a la madera adheridos a superficies rígidas son pobres absorbentes del sonido (absorben entre el 5 - 10% y reflejan más del 90%); dejando la superficie de la madera en forma rugosa se aumenta muy ligeramente la absorción. Por el contrario las placas acústicas porosas fabricadas con fibras de madera pueden absorber más del 90% del sonido y reflejar el resto. Los paneles de tableros contrachapados pueden utilizarse como paneles resonantes.

### **1.4.3. Tipos de maderas para la construcción de guitarras**

De acuerdo con la tradición, las maderas utilizadas para las tapas armónicas poseen propiedades que están en una determinada gama, casi siempre maderas blandas (cedro y pino abeto), mientras que las utilizadas para aros y fondo poseen propiedades diferentes, normalmente duras (palosanto, arce, caoba, etc.). [6]

En este trabajo se analiza las propiedades del pino abeto alemán y el cedro canadiense, de manera que se desea encontrar la relación entre estas y algunas de las características del sonido. Debido a esto es importante el estudio tanto de los rasgos más importantes de la madera como de la física que describe al sonido. Así, en el siguiente capítulo se estudiarán algunas de las propiedades más relevantes del sonido.

## CAPÍTULO 2: FÍSICA DEL SONIDO

La física del sonido proporciona una herramienta muy útil al momento de estudiar el comportamiento de los instrumentos musicales, ya que es el sonido el componente esencial que caracteriza a cada instrumento. En este capítulo se presentará una visión general del sonido, partiendo de su definición y descripción fundamental, pasando por sus propiedades y características más importantes, hasta llegar a la manera en que habitualmente se suele representar. Además de esto se consideran aspectos como el fenómeno de resonancia, el principio de superposición y ondas estacionarias.

### 2.1. Principios básicos del sonido

El sonido se puede definir de formas muy diversas. Entre ellas, se encuentra la siguiente:

Vibración mecánica que se propaga a través de un medio material elástico y denso (habitualmente el aire), y que es capaz de producir una sensación auditiva. De dicha definición se desprende que, a diferencia de la luz, el sonido no se propaga a través del vacío y, además, se asocia con el concepto de estímulo físico. [8]

El elemento generador del sonido se denomina fuente sonora por ejemplo un tambor, cuerda de un violín, cuerdas vocales, etc. La generación del sonido tiene lugar cuando dicha fuente entra en vibración. Esta vibración es transmitida a las partículas de aire adyacentes a la misma, y que a su vez, la transmiten a las partículas contiguas. Las partículas no se desplazan con la perturbación, sino que simplemente oscilan alrededor de su posición de equilibrio. La oscilación de las partículas tiene lugar en la misma dirección que la de la propagación de la onda, y ésta es llamada Onda longitudinal.

La ecuación (2.1) describe una onda sonora armónica, en donde  $s(x, t)$  representa el desplazamiento de las moléculas respecto a su posición de equilibrio,  $s_0$  es la amplitud de la onda,  $k = 2\pi/\lambda$  es el vector de onda,  $\lambda$  es la longitud de onda,  $\omega$  es la frecuencia angular, y  $t$  es el tiempo:

$$s(x, t) = s_0 \text{sen}(kx - \omega t) \quad (2.1)$$

Estos desplazamientos se verifican a lo largo de la dirección del movimiento de la onda y dan lugar a variaciones de densidad y presión de aire. Como la presión del gas es proporcional a su densidad, el cambio de presión es máximo cuando la variación de densidad es máxima; a diferencia de esto las ondas de presión y densidad están desfasadas  $90^\circ$  respecto al desplazamiento de la onda. Así, cuando el desplazamiento es cero, los cambios de presión y densidad son máximos o mínimos. Entonces, una onda de desplazamiento dada por la ecuación anterior implica una onda de presión dada por:

$$p = p_0 \text{sen}\left(kx - \omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.2)$$

Donde  $p$  representa el cambio de presión respecto a la presión de equilibrio y  $p_0$  es el valor máximo de este cambio. La manera más habitual de expresar cuantitativamente la magnitud de un campo sonoro es mediante la presión sonora.

### 2.1.1. Nivel de presión sonora (SPL)

El nivel de presión sonora determina el nivel de presión que realiza la onda sonora en relación a un nivel de referencia en el aire; éste se utiliza para comparar diferentes niveles de sonido. En principio, el valor a considerar es la diferencia entre el valor fluctuante de la presión sonora total  $P_T$  y su valor de equilibrio  $P_0$ . Debido a la variación de dicha magnitud con el tiempo, se utiliza como valor representativo su promedio temporal, que recibe el nombre de valor eficaz o r.m.s. (“root-mean-square”). La unidad de medida es el Newton/metro<sup>2</sup> (N/m<sup>2</sup>) o Pascal (Pa).

En la Figura.2.1. se observa la evolución de la presión  $P_T$ , en función del tiempo, en un punto situado a una distancia determinada de la fuente sonora.

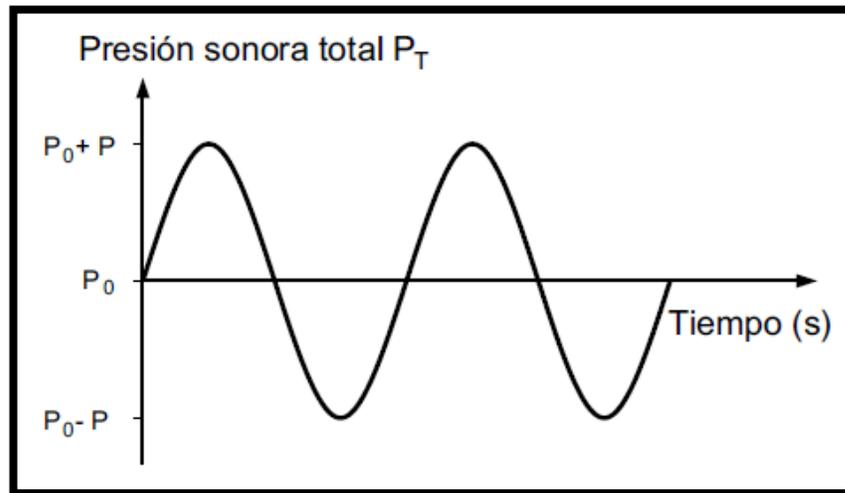


Figura.2.1. Evolución de la presión sonora total  $P_T$  en función del tiempo en un punto cualquiera del espacio.

La utilización del umbral de audición como referencia tiene como objetivo que todos los sonidos audibles sean representados por valores de SPL positivos. Para esta representación se utiliza el decibelio que equivale a la décima parte (0.1) del Belio, que es una unidad logarítmica de comparación entre magnitudes. Esta unidad surge por dos razones:

- Los órdenes de magnitud que es capaz de oír el ser humano son muy amplios, desde  $2 * 10^{-5}$  Pa hasta 100 Pa de presión sonora.
- El oído humano funciona de una forma muy similar a la logarítmica, lo cual hace que el uso de este tipo de unidad sea más adecuado que una unidad lineal.

De esta manera, las cifras manejadas son mucho más simples y, por ejemplo, se tiene que los cambios de nivel sonoro de 5 dB producen una variación mínima de nivel sonoro perceptible.

Así, se define el nivel de presión sonora, SPL, como:

$$SPL = 20 \log_{10} \frac{P_{ef}}{P_{ref}} = 10 \log_{10} \frac{P_{ef}^2}{P_{ref}^2} \quad (dB) \quad (2.3)$$

donde  $P_{ef}$  es el valor eficaz de la presión sonora y  $P_{ref}$  es la presión de referencia:

$$P_{ref} = 20 * 10^{-6} Pa$$

El valor de  $P_{ref}$  implica que un sonido de 1 kHz se puede percibir, en promedio, cuando  $SPL > 0 dB$ . En la Tabla.2.1. se dan valores típicos de la presión eficaz sonora y del SPL para algunos sonidos habituales.

Tabla.2.1. Presión eficaz sonora y nivel de presión sonora para algunas fuentes sonoras, ambientes y situaciones acústicas típicas.

Fuente	$P_{ef}$ [Pa]	SPL [dB]
Umbral de dolor	20	120
Discoteca a todo volumen	6.3	110
Martillo neumático a 2 m	3.6	105
Ambiente industrial ruidoso	0.63	90
Piano a 1 m con fuerza media	0.20	80
Automóvil silencioso a 2 m	0.063	70
Conversación normal	0.020	60
Ruido urbano de noche	0.0063	50
Habitación interior (día)	0.0020	40
Habitación interior (noche)	0.00063	30
Estudio de grabación	0.00020	20
Cámara sonoamortiguada	0.000063	10
Umbral de audición a 1 kHz	0.000020	0

### 2.1.2. Potencia sonora

La potencia sonora es la cantidad de energía radiada por una fuente determinada en un segundo y se mide en watts. La potencia sonora de un foco sonoro es constante y sólo depende de las características de la fuente. En la Figura.2.2. se ilustra los cambios de potencia sonora con respecto a la frecuencia en la tapa armónica.

### 2.1.3. Frecuencia del sonido

El número de oscilaciones por segundo de la presión sonora  $P$  se denomina frecuencia  $f$  del sonido y se mide en hertz (Hz) o ciclos por segundo (*ciclos \* 1/s*). La frecuencia del sonido coincide con la frecuencia de la vibración mecánica que lo ha generado. La Figura.2.2. muestra la potencia sonora como función de la frecuencia en la tapa de la guitarra.

## 2.2. Resonancia

La resonancia mecánica es un fenómeno en el que la fuerza constante que aplicamos a un sistema, coincide con la frecuencia natural, una característica propia de cada sistema oscilante. Cuando ambas magnitudes coinciden, la amplitud del sistema oscilante alcanza su punto máximo. De igual manera, cuando un cuerpo que puede vibrar es alcanzado por alguna onda de frecuencia cercana o coincidente con alguna de sus frecuencias propias, comienza a vibrar en esa frecuencia. Se dice que el cuerpo “resuena”. Así, la resonancia refuerza el sonido excitador. Las cajas de los instrumentos de cuerda y de percusión hacen el papel de resonadores, al potenciar el sonido de los elementos vibratorios (cuerdas y parches).

La resonancia ocurre a una frecuencia específica. Sin embargo, cuando la diferencia de la frecuencia natural del cuerpo y la de la fuente es muy pequeña, existe una fuerte reacción del cuerpo, muy semejante a la resonancia perfecta. Algunos cuerpos o sistemas responden a un amplio rango de frecuencias. Los pianos y los violines son un ejemplo de instrumentos con una curva ancha de resonancia.

En términos físicos, la caja de resonancia de la guitarra es un resonador de Helmholtz (Figura.2.3.), pero en este caso, las paredes de la guitarra no son totalmente rígidas. En la Figura.0.1. se puede observar los componentes de la caja de resonancia de la guitarra.

### Respuesta en frecuencia de la tapa, Potencia Sonora

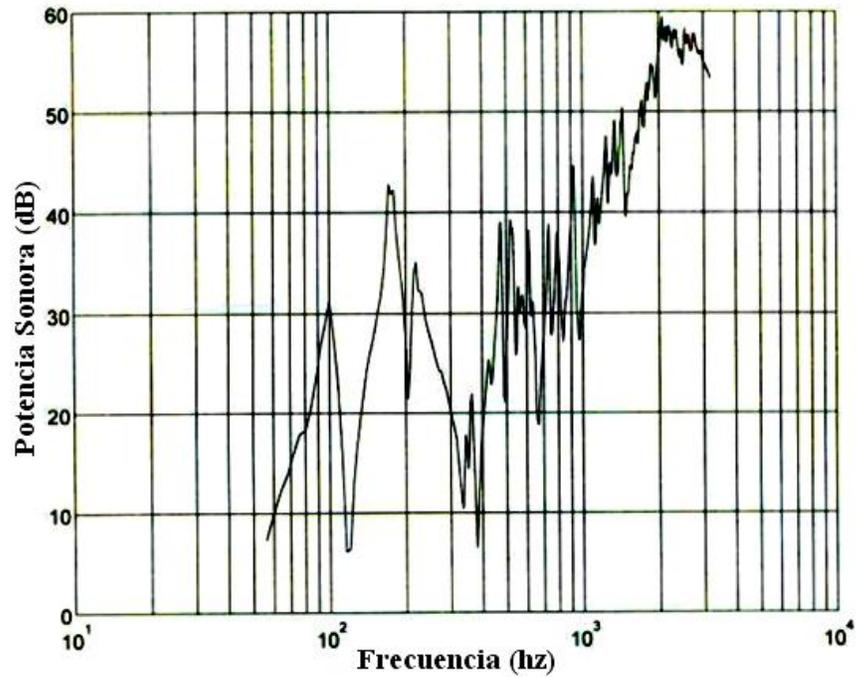


Figura.2.2. Respuesta en frecuencia de la tapa, Potencia Sonora. [9]

Las relaciones del resonador de Helmholtz son las siguientes:

$$F_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{LV}} \quad (2.4)$$

Donde  $L = l_f + 1.6r$ ,  $S$  es el área de la circunferencia de la boca de la caja dada por  $S = \pi r^2$ ,  $V$  es el volumen interior de la caja,  $c$  es la velocidad del sonido en el aire,  $F_r$  es la frecuencia de resonancia propia del resonador, y  $r$  es el radio de la boca.

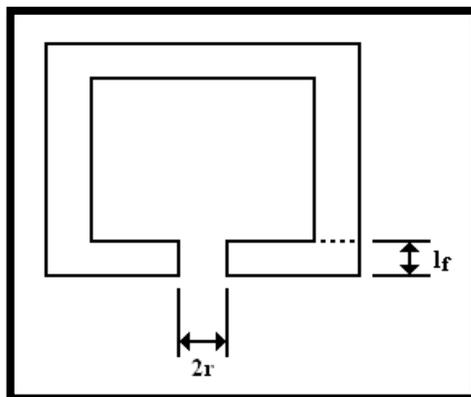


Figura.2.3. Resonador de Helmholtz.

De acuerdo con el resonador de Helmholtz, la guitarra tiene una frecuencia de resonancia alrededor de los 180 Hz, lo cual coincide con la segunda frecuencia de resonancia de la tapa armónica. De la expresión 2.4, se observa que la frecuencia de resonancia del aire contenido en la caja es función de la sección (espesor de la madera de la caja), del diámetro de la boca y del volumen de la caja. Como el volumen de la caja puede cambiar significativamente haciendo una pequeña variación en el espesor de ésta; se puede afirmar que las notas más graves se podrían realzar si se incrementa el ancho de los flancos, y de manera similar, se reforzarían las notas agudas si se reduce el ancho de ellos. [6]

### **2.3. Características del sonido**

Las principales características que se van a estudiar en este apartado son el timbre, el tono, y la intensidad.

#### **2.3.1. Timbre**

Es la propiedad que permite distinguir si un sonido de igual frecuencia es producido por una fuente u otra (por ejemplo, un piano o un saxofón). Está determinado por la combinación de frecuencia fundamental y sus armónicas, variando en cantidad e intensidad. Los sonidos normalmente poseen armónicos cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental. Por ejemplo, dos violines de diferente fabricación producen diferente timbre aun tocando la misma nota. El timbre se relaciona con el hecho de que un sonido casi nunca es puro, o sea, casi nunca corresponde a una onda sonora dada la expresión “ $A\sin(\omega t)$ ”, sino que suele haber una frecuencia fundamental a la que pertenece la mayor parte de energía de ese sonido y otras frecuencias que llevan su cantidad de energía y responden a otra expresión similar “ $A'\sin(\omega't)$ ”. Estos se llaman armónicos y se superponen a la onda correspondiente de la frecuencia fundamental.

#### **2.3.2. Tono**

Permite distinguir los sonidos agudos de los graves, siendo los agudos los producidos por focos que vibran a frecuencias elevadas y los graves los que vibran a frecuencias bajas. El tono representa la posición del sonido en la escala musical y está dado en función de la frecuencia.

#### **2.3.3. Intensidad**

Es el flujo de energía sonora por unidad de área, siendo expresada en Watts acústicos por metro cuadrado ( $W/m^2$ ). Se relaciona con la amplitud de las vibraciones que llegan a nuestros tímpanos. A mayor intensidad, mayor presión sonora y mayor sensación auditiva.

Además de la intensidad se puede definir el Nivel de Intensidad Sonora (NIS o SIL) que representa al volumen, y se expresa, haciendo uso nuevamente del decibel, de la siguiente manera:

$$SIL = 10 * \log \frac{I}{I_0} (dB)$$

Donde  $I_0 = 10^{-12} \text{ w/m}^2$ .

## 2.4. Representación del sonido

En general hay dos maneras de representar el sonido: una es la representación frecuencial y otra es la representación temporal. En esta sección se describirá brevemente cada una de ellas.

### 2.4.1. Representación frecuencial: sonido y espectro

Usualmente se grafica el espectrograma o el espectro de una nota musical. Se puede decir que el espectro es una foto acústica de la nota. En la Figura.2.4. se explica el significado del espectro. La escala horizontal es el eje de la frecuencia, y este corresponde a la ubicación vertical en un pentagrama, esto en la representación musical. Un tono específico tiene una ubicación específica, tal como es el caso de la nota A\* de 220 Hz. En el espectro la nota es representada por una línea vertical en la frecuencia 220 Hz. En cuanto a la intensidad de la nota, un sonido fuerte (*ff*) corresponde a una barra alta y un sonido débil (*pp*) corresponde a una barra baja. El nivel de la nota puede leerse en la escala vertical en dB y su frecuencia en la escala horizontal en Hz. Esto muestra así que la frecuencia y el nivel pueden describir una nota o tono. El tono o la nota es una construcción acústica del sonido que se escucha.

---

\*La notación A hace referencia a la nota La en el cifrado norteamericano.

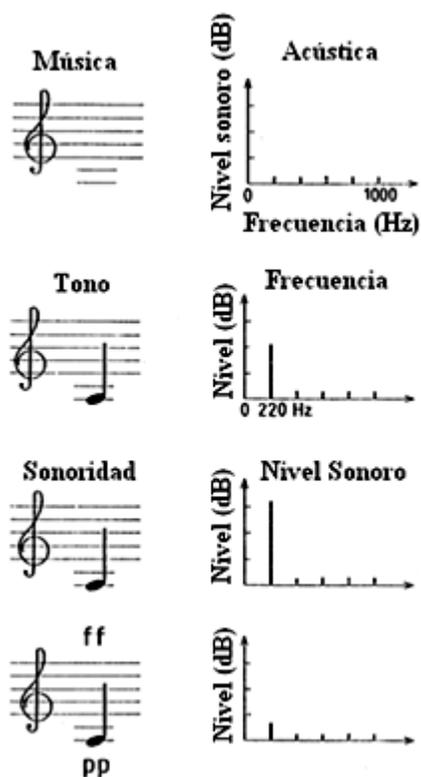


Figura.2.4. Descripción musical y acústica de una nota o tono. [10]

La mayoría de tonos o notas musicales no tienen la representación simple que se mostró anteriormente. En general, esta consiste de varios tonos, como se muestra en la Figura.2.5. La nota musical A 220 Hz en la figura, se representa en la segunda línea adicional debajo del pentagrama. En general una representación más completa se muestra a la izquierda de la figura, donde se observa todos los sonidos que acompañan a la nota fundamental A 220 Hz. Aquí se observa la nota fundamental, una nota una octava más alta, una nota una octava más una quinta justa más alta, una nota más a dos octavas por encima de la fundamental, y por último una nota a dos octavas más una tercera mayor de su fundamental. Las notas producidas por instrumentos melódicos tales como el violín, el clarinete y la trompeta están compuestas por varios tonos simples como se muestra en la Figura.2.5.

El espectro de una nota musical real consta de muchas barras o líneas verticales. Los diferentes tonos o notas que acompañan a la nota base son llamados parciales armónicos o simplemente armónicos y el armónico más bajo es llamado fundamental. Una mirada detallada revela que la frecuencia del segundo parcial es dos veces la de la fundamental, la frecuencia del tercer parcial es tres veces más alta que la de la fundamental, etc. La frecuencia de la fundamental corresponde a la altura y el número de parciales y sus niveles corresponden al timbre.

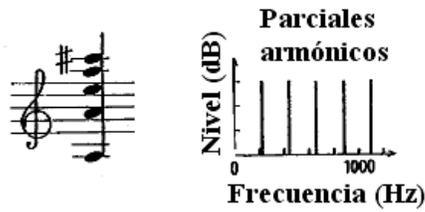


Figura.2.5. Descripción musical y acústica de una nota real. [10]

### 2.4.2. Representación temporal: Oscilograma

Un tono simple con un sólo parcial tiene un oscilograma y un espectro correspondiente. La historia temporal se repite después de intervalos iguales de tiempo. La Figura.2.6. muestra el oscilograma y el espectro de un tono simple y el de un tono con cuatro parciales de niveles iguales.

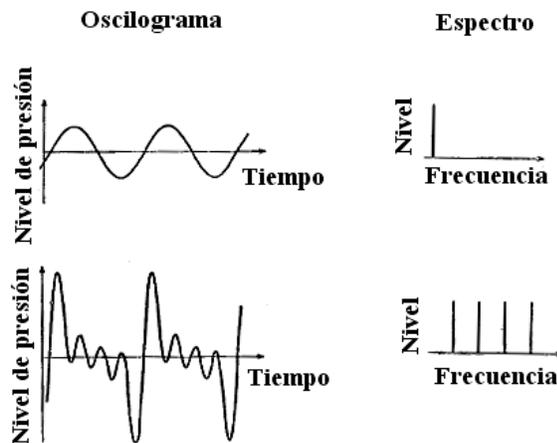


Figura.2.6. Historia temporal y espectro de un tono simple, y un tono real con cuatro armónicos del mismo nivel. [10]

Cuando se produce un sonido, este no es el mismo en todos los intervalos de tiempo. En general un sonido real se representa como se muestra en la Figura.2.7 y consta de una sección inicial, sección intermedia más o menos constante y una sección final. La sección inicial es llamada inicio transitorio y corresponde musicalmente al ataque. La sección final del sonido es llamado final transitorio y corresponde al decaimiento de las vibraciones de las cuerdas, por ejemplo.

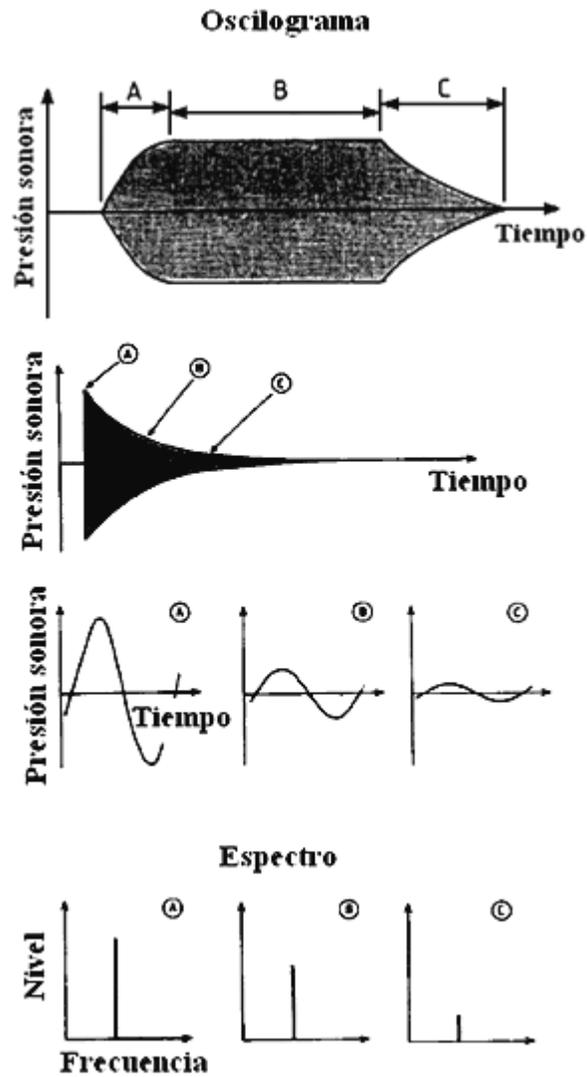


Figura.2.7. Oscilograma y espectrograma de un tono, desde su inicio transitorio (ataque) hasta su final transitorio (decaimiento). A es el inicio transitorio, B es la sección relativamente constante, y C es el final transitorio. [10]

## 2.5. Superposición y ondas estacionarias [11]

Cuando dos o más ondas se encuentran en el espacio, sus perturbaciones individuales (representadas matemáticamente por sus funciones de onda) se superponen y se suman algebraicamente creando una nueva onda. Este principio se llama principio de superposición. En ciertas circunstancias la superposición de ondas armónicas de la misma frecuencia produce patrones en el espacio. Este fenómeno se llama interferencia.

Cuando las ondas están confinadas en el espacio, como las ondas en una cuerda o en un tubo, o las ondas luminosas de un láser, se producen reflexiones en ambos extremos y, por consiguiente, existen ondas que se mueven en los dos sentidos y que se combinan de acuerdo con el principio de superposición. Para una cuerda o un tubo determinados, existen ciertas frecuencias para las cuales la superposición da un patrón de vibración estacionario denominado onda estacionaria.

Los conceptos estudiados en este capítulo son de gran importancia en el desarrollo del trabajo ya que con ellos se procederá a la realización de un análisis acústico a diferentes guitarras con maderas de pino abeto y cedro canadiense. De esta manera en el capítulo siguiente se tendrán en cuenta conceptos como el volumen (asociado con la intensidad), la duración, el timbre y la representación temporal y frecuencial.

## CAPÍTULO 3: ANÁLISIS ACÚSTICO

En este capítulo se expone el análisis acústico realizado a diferentes guitarras con tapas armónicas de pino abeto y cedro canadiense. En primera instancia se estudia de manera breve el procesamiento de señales y algunos conceptos básicos como la energía y la potencia de una señal, y posterior a esto se muestran los datos tomados experimentalmente y el modo del que se extrae la información de ellos.

### 3.1. Procesamiento de señales

El procesamiento digital de señales es una herramienta muy útil que permite manipular una señal digital con diferentes propósitos. En el procesamiento de señales, es común analizar una señal en dos dominios: el dominio del tiempo y el dominio de la frecuencia. Así, de la representación en el dominio del tiempo se puede determinar si la señal es periódica o aleatoria. Además, a partir de los valores en el dominio del tiempo se puede calcular valores como media, desviación estándar, varianza y potencia. De otra manera, información como el contenido de frecuencias de la señal, no son evidentes en el dominio del tiempo y se deben analizar en el dominio de la frecuencia. El contenido de frecuencias de una señal también se denomina espectro de frecuencia. La señal en el dominio del tiempo se representa con los valores de datos  $x_k$ ; la señal en el dominio de la frecuencia se puede representar con un conjunto de valores complejos  $X_k$ , que representan los senoides con los cuales se puede representar la señal. En el presente estudio se aplica esta técnica a las diferentes muestras tomadas de sonido, las cuales son consideradas como señales digitales, de las cuales se obtiene su contenido frecuencial, energía y duración.

Para convertir una señal en el dominio del tiempo en un conjunto de puntos en el dominio de la frecuencia se utiliza algunos métodos de los cuales se destaca el algoritmo de transformada de Fourier (DFT). La entrada del algoritmo DFT es un conjunto de  $N$  valores de tiempo  $x_k$ ; con ellos, el algoritmo calcula un conjunto de  $N$  valores complejos  $X_k$ , que representan la información en el dominio de la frecuencia.

Como la señal analógica es muestreada cada  $T_s$  segundos, entonces se obtienen  $1/T_s$  muestras por segundo; así, la tasa de muestreo o frecuencia de muestreo  $f_s$  es  $\frac{1}{T_s}$  *muestras/s*, o  $1/T_s$  Hz. A la hora de generar una señal digital se debe tener en cuenta que la tasa de muestreo no debe ser muy lenta con el fin de evitar un tipo de interferencia llamado *aliasing*. El *aliasing* se evita si se muestrea una señal con una frecuencia mayor que dos veces la mayor frecuencia presente entre todas las senoides de la señal.

### 3.2. Energía y potencia de una señal

La energía de una señal en tiempo continuo se define como el área bajo el cuadrado de la magnitud de la señal. Si  $x(t)$  es una señal en tiempo continuo, su energía está dada por [12]:

$$E_x = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt \quad (3.1)$$

La energía se define en esta forma para ser proporcional a la energía física real entregada por una señal. En muchos tipos de análisis de sistemas el uso de la energía de la señal es más conveniente que el uso de la energía física real, esto debido a que estimar la energía física real no es posible o es muy complejo. La energía para una señal en tiempo discreto se define de manera análoga, así:

$$E_x = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |x[n]|^2 \quad (3.2)$$

y las unidades son simplemente el cuadrado de las unidades de la propia señal.

En muchas señales ni la integral ni la sumatoria anterior convergen, esto debido a que la energía de la señal es infinita. En señales de este tipo suele ser más conveniente tratar con la potencia promedio de la señal, la cual se define mediante [12]:

$$P_x = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-(T/2)}^{T/2} |x(t)|^2 dt \quad (3.3)$$

En esta definición de la potencia promedio de la señal, la integral es la energía de la señal en un tiempo  $T$ , y esta se divide después entre  $T$  para producir la potencia en ese intervalo. Para señales en tiempo discreto la definición de potencia promedio de una secuencia periódica con periodo fundamental  $N$  es:

$$P_x = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |x(n)|^2 \quad (3.4)$$

De otra manera, si se tiene una señal  $x(n)$  para  $n = 0, 1, \dots, N - 1$ , entonces la energía total se puede calcular como:

$$E_x = \sum_{n=0}^{N-1} |x(n)|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |X(k)|^2 \quad (3.5)$$

en donde  $x(n)$  representa la señal en el dominio del tiempo y  $X(k)$  representa a la misma señal en el dominio de la frecuencia.

Por otra parte, si se tiene una señal no periódica, muestreada a una frecuencia  $f_s$  entonces se tiene que la energía total es dada por:

$$E_t = \sum_{n=n_1}^{n_2} |x(nT_s)|^2 T_s = \frac{T_s}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |X(k)|^2 \quad (3.6)$$

Donde  $T_s$  es el tiempo de muestreo.

La expresión anterior (ecuación 3.6) muestra la relación de Parseval para señales aperiódicas de energía finita y pone en manifiesto el principio de conservación de la energía en los dominios del tiempo y la frecuencia.

### 3.3. Recolección de datos y metodología

Para el tratamiento de las señales, inicialmente se calcula la energía total de cada señal, la cual se asocia con la amplitud del sonido, luego se toma el tiempo en el que se consume el 95% de esa energía, relacionándolo con la duración, y además de esto se utiliza la transformada de Fourier para obtener el contenido frecuencial, que finalmente se vincula con el timbre.

A fin de encontrar una expresión de la amplitud en el sonido, se asoció ésta con la energía total correspondiente a cada señal; de esta forma las señales más energéticas corresponden a los sonidos con mayor amplitud. De estos datos se hizo una gráfica de Energía Total vs. Frecuencia, se realizó una regresión lineal para cada curva, de la cual se obtuvo la pendiente y el corte con el eje vertical. Con los valores de las pendientes se pudo determinar qué tan homogénea en sus registros era cada guitarra en cuanto a la amplitud de su sonido; mostrando mayor homogeneidad las curvas con pendientes más cercanas a cero. Además, se calcularon los promedios de las energías de las señales correspondientes a cada guitarra, los cuales proporcionan información acerca de la potencia acústica generada por cada guitarra, así, los datos con promedios más grandes corresponden a potencias acústicas mayores.

Para determinar la duración del sonido se consideró el intervalo de tiempo en el que se consume el 95% de la señal. De la misma manera como se procedió en el análisis anterior, se hizo una gráfica de Tiempo vs. Frecuencia, se realizó una regresión lineal para cada curva y se obtuvo la pendiente y el corte con el eje y. Con los valores de las pendientes se determinó qué tan homogénea en sus registros era cada guitarra en cuanto a la duración de su sonido; mostrando mayor homogeneidad las curvas con pendientes más cercanas a cero. Del mismo modo, se calculó los promedios de los tiempos de las señales correspondientes a cada guitarra, lo cual proporcionó información acerca de la duración general del sonido

producido por cada guitarra, así, los datos con promedios más grandes corresponden a sonidos con mayor duración.

El análisis del timbre se realizó de manera descriptiva, tomando la cantidad de armónicos presentes en cada señal. Entonces se consideró que las señales con mayor número de armónicos corresponden a sonidos con una mejor característica tímbrica. Para el análisis de datos del primer grupo se realizó un filtrado adicional con un filtro *comb* o peine (ver Anexo II). En el análisis del timbre se analizó las señales sin el segundo filtrado, esto con el fin de tomar las señales con el mayor contenido frecuencial posible. A continuación se muestra los datos obtenidos correspondientes a la nota E3 para el primer y segundo grupo de guitarras. En el Anexo III se puede encontrar los datos correspondientes a las notas E4, E5 y E6 del primer y segundo grupo.

### **3.3.1. Población y Muestra**

El análisis acústico se realizó con dos grupos de guitarras, en donde las condiciones de medida para cada grupo fueron diferentes. Sin embargo, en todas las guitarras analizadas se intentó mantener constantes todos los aspectos que influyen en el sonido, de tal manera que sólo se considera la influencia del material de la tapa armónica. La primera medida se realizó en la ciudad de Cali con guitarras del Luthier Jorge Noguera. Se utilizaron 3 guitarras, dos con tapa de cedro y una con tapa de pino. La segunda medida se realizó en la ciudad de Popayán con tres guitarras diferentes: una guitarra Alhambra 1C con tapa de pino, una guitarra Álvaro 55 con tapa de cedro, y una guitarra Yamaha CG171C con tapa de cedro. Para cada guitarra se tomaron cuatro muestras de sonido de 13 segundos de duración correspondientes a las notas E3, E4, E5 y E6. Para el análisis de los archivos de audio, primero se procedió a hacer un filtrado de ruido de los archivos con el software Adobe Audition 3. Como segunda medida se observó las señales en función del tiempo y se calculó sus respectivos espectros frecuenciales.

### **3.3.2. Análisis de Datos**

En el primer grupo de guitarras se referencia por el tipo de madera que se encuentra en la tapa, así se tiene: Cedro1, Cedro2, y Pino, que corresponden a las 3 guitarras que componen el grupo. Por su parte, el segundo grupo de guitarras está referenciado por la marca de cada guitarra, así se tiene: Alhambra, Alvaro, y Yamaha, que corresponden a las 3 guitarras que componen este grupo.

#### **Determinación de la amplitud del sonido**

La Figura.3.1. muestra las señales de sonido correspondientes a la nota E3 para cada guitarra a) del primer grupo y b) del segundo grupo.

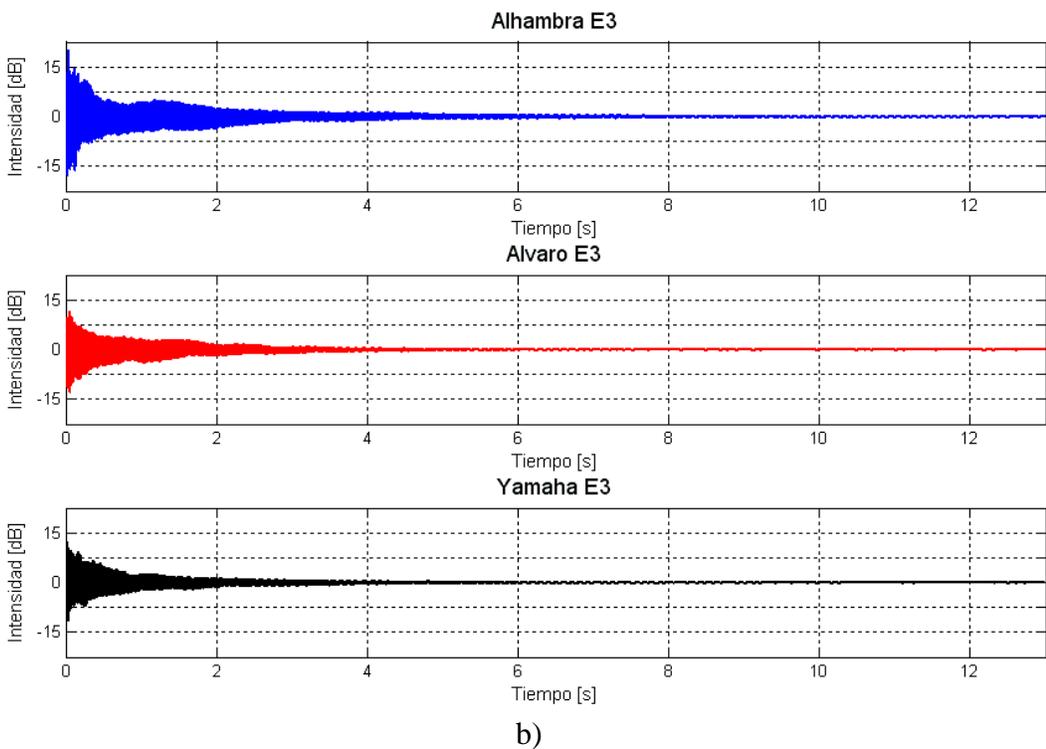
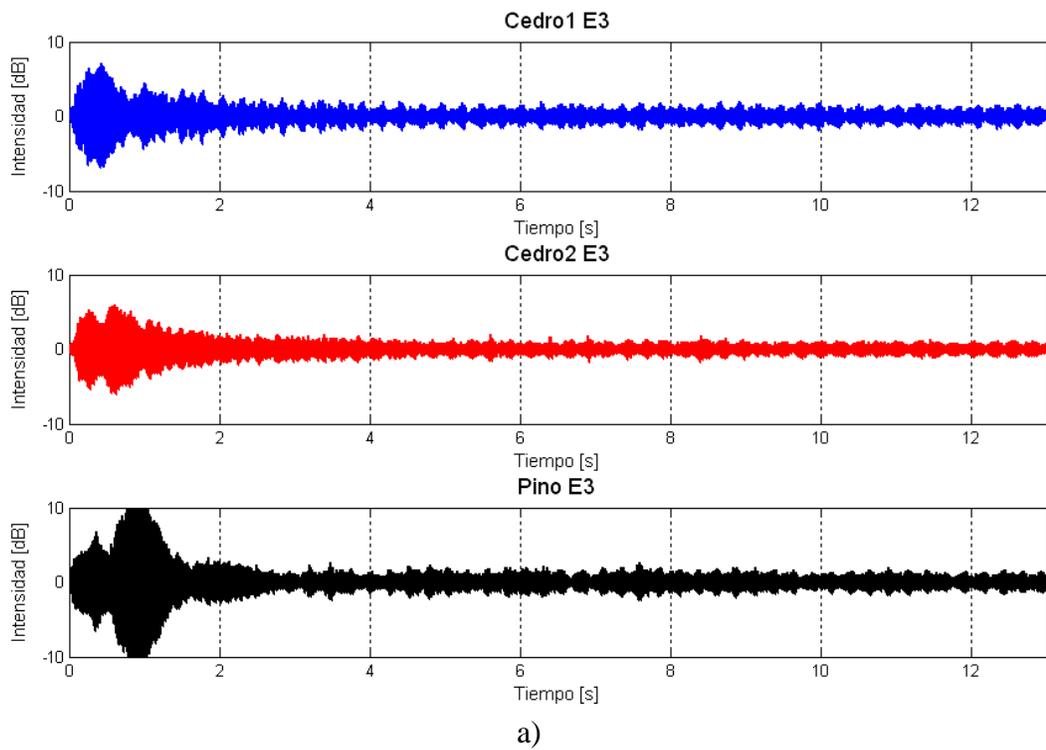


Figura.3.1. Señales correspondientes a la nota E3 para cada guitarra a) del primer grupo, y b) del segundo grupo.

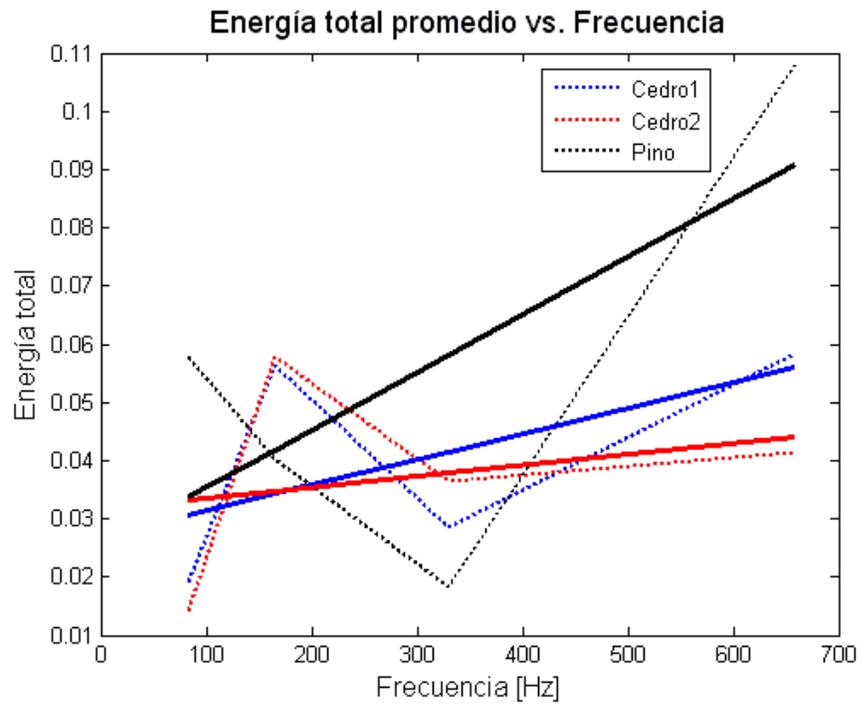
En la Figura.3.1.a. se observa que el sonido para la nota E3 tiene una amplitud mayor en la guitarra Pino. En la Figura.3.1.b. se observa que el sonido para la nota E3 tiene una amplitud mayor en la guitarra Alhambra. Para el análisis de estas señales se calcularon sus energías totales, las cuales se consignan en la Tabla.3.1. Adicional a esto se calcula el promedio de estas energías para cada guitarra.

Tabla.3.1. Energías totales del primer y segundo grupo de guitarras.

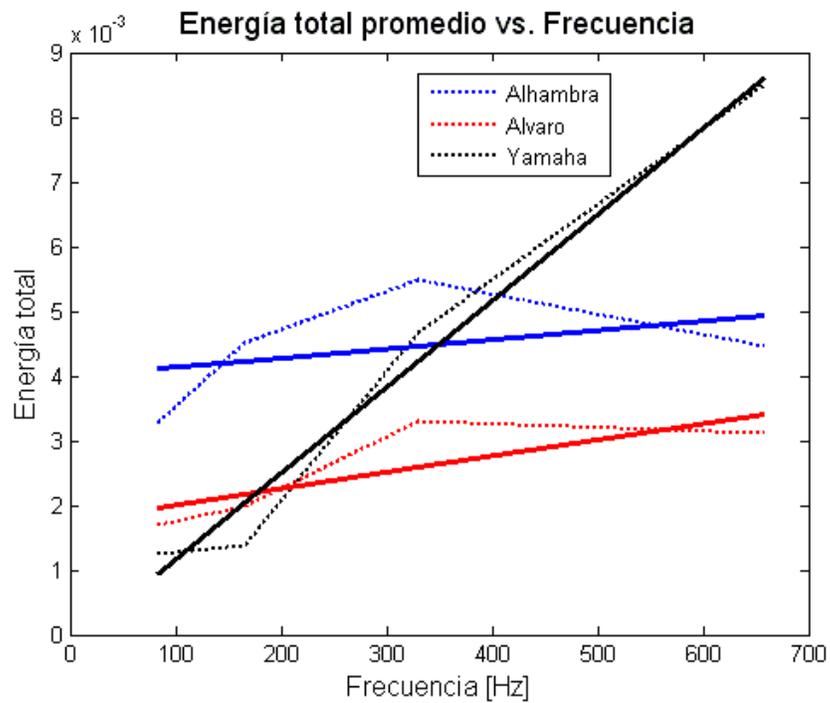
Guitarra Nota	Grupo 1			Grupo 2		
	Cedro1	Cedro2	Pino	Alvaro	Yamaha	Alhambra
<b>E3</b>	0.0191	0.0144	<b>0.0578</b>	0.0017	0.0012	<b>0.0033</b>
<b>E4</b>	0.0564	<b>0.0577</b>	0.0404	0.0020	0.0014	<b>0.0045</b>
<b>E5</b>	0.0286	<b>0.0365</b>	0.0183	0.0033	0.0047	<b>0.0055</b>
<b>E6</b>	0.0583	0.0413	<b>0.1080</b>	0.0031	<b>0.0085</b>	0.0045
<b>Promedio</b>	0.0406	0.0375	<b>0.0561</b>	0.0025	0.0040	<b>0.0044</b>

Se observa de la Tabla.3.1. que la guitarra Cedro2 presenta la mayor energía en las notas E4 y E5; mientras que la guitarra Pino tiene la mayor energía en las notas E3 y E6. Además, esta guitarra tiene la mayor energía promedio, lo que corresponde a una mayor amplitud general del sonido. Por otra parte, cabe señalar que las energías promedio de las guitarras Cedro1 y Cedro2 son comparables entre si. De la misma manera, la guitarra Alhambra presenta la mayor energía en las notas E3, E4 y E5. Además esta guitarra tiene la mayor energía promedio, lo que corresponde a una mayor amplitud general del sonido. También se debe notar una energía muy grande en la guitarra Yamaha en la nota E6, esto debido probablemente a la construcción, la cual tiende a amplificar en un grado mayor las notas agudas.

Para visualizar la homogeneidad, se analiza la relación energía-frecuencia, y se tiene para el primer y segundo grupo de guitarras las siguientes gráficas.



a)



b)

Figura.3.2. Energía total promedio vs Frecuencia, a) para el primer grupo de guitarras, y b) para el segundo grupo de guitarras. La línea continua en las figuras representa la regresión lineal de cada curva.

De las energías totales se calcula y se grafica la regresión lineal para cada guitarra buscando una tendencia con la pendiente. En la Tabla.3.2. se muestra la regresión lineal de las curvas de energía del primer y segundo grupo de guitarras.

Tabla.3.2. Regresión lineal de las curvas de Energía del primer y segundo grupo de guitarras.

	Guitarra	Pendiente (m)	Corte eje vertical (b)
<b>Grupo 1</b>	<b>Cedro1</b>	0.000043758	0.027100821
	<b>Cedro2</b>	<b>0.000018615</b>	0.031706989
	<b>Pino</b>	0.000098843	0.025566273
<b>Grupo 2</b>	<b>Alvaro</b>	0.000002490	0.001760009
	<b>Yamaha</b>	0.000013309	-0.000157823
	<b>Alhambra</b>	<b>0.000001411</b>	0.003997171

De la Tabla.3.2. se observa que en el primer grupo la guitarra Cedro2 presenta la menor pendiente seguida por la guitarra Cedro1. Así, la guitarra Cedro2 tiene la mayor homogeneidad en la amplitud del sonido. Para el segundo grupo se observa que la guitarra Alhambra presenta la menor pendiente. Así, ésta guitarra tiene la mayor homogeneidad en la amplitud del sonido. También es importante resaltar que las guitarras Alhambra y Alvaro tienen pendientes similares, considerándose además, que estas guitarras son de construcción española. Además se observa que para los dos grupos de guitarras las pendientes son positivas y los cambios son notorios a partir de la quinta cifra decimal.

### Determinación de la duración del sonido

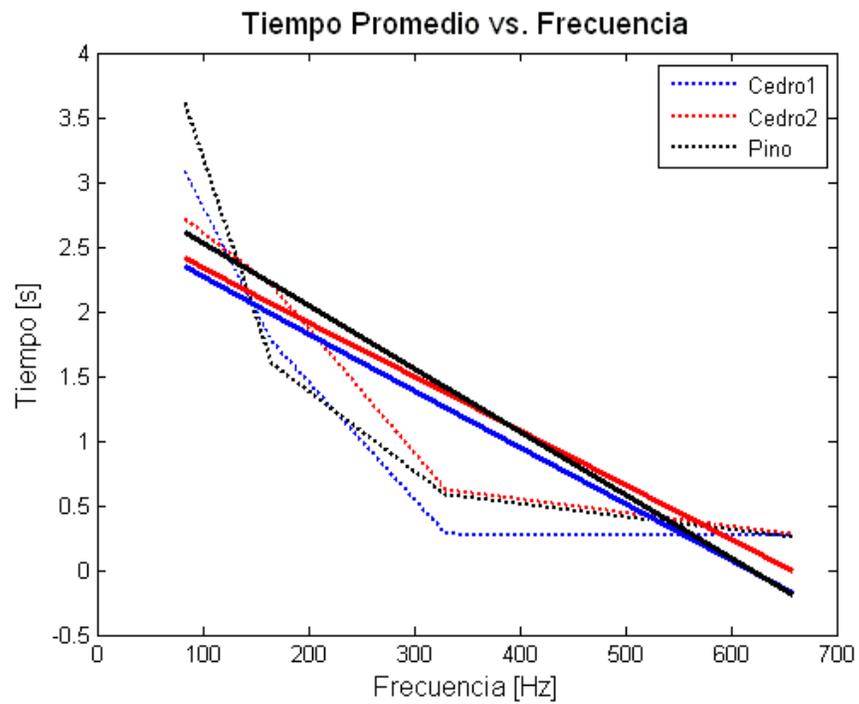
En la Tabla.3.3. se muestra el tiempo en segundos en el que se consume el 95% de la energía total de las señales de sonido para el primer y segundo grupo de guitarras.

Tabla.3.3. Duración en segundos del sonido. 95% de la Energía total para el primer y segundo grupo.

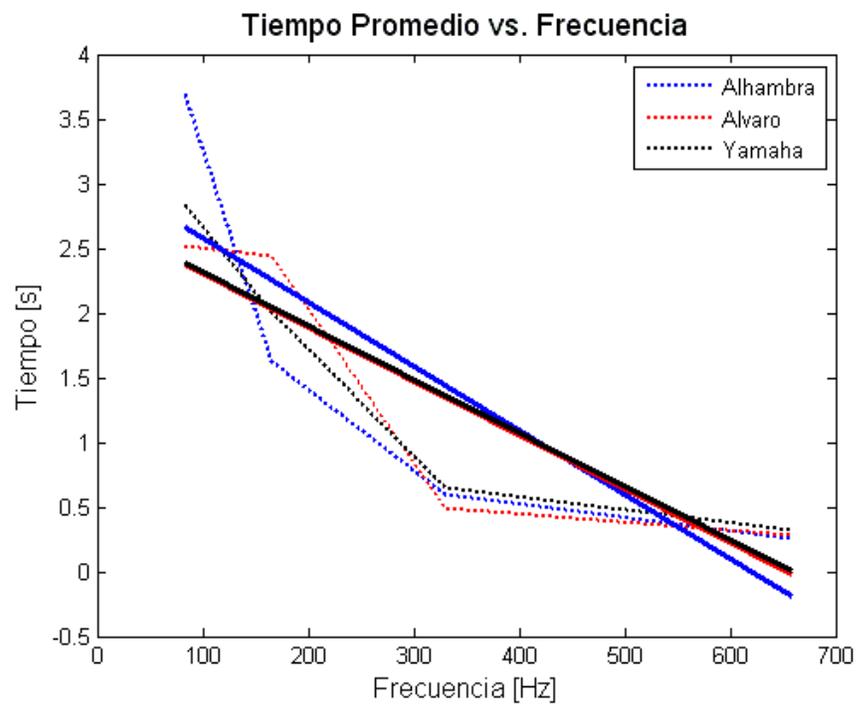
Guitarra Nota	Grupo 1			Grupo 2		
	Cedro1	Cedro2	Pino	Alvaro	Yamaha	Alhambra
<b>E3</b>	3.0880	2.7211	<b>3.6156</b>	2.5168	2.8393	<b>3.6928</b>
<b>E4</b>	1.7706	<b>2.2027</b>	1.5982	<b>2.4470</b>	2.0024	1.6226
<b>E5</b>	0.2858	<b>0.6231</b>	0.5838	0.4979	<b>0.6491</b>	0.5930
<b>E6</b>	0.2660	<b>0.2893</b>	0.2514	0.2873	<b>0.3177</b>	0.2630
<b>Promedio</b>	1.3526	1.4590	<b>1.5123</b>	1.4372	1.4521	<b>1.5429</b>

Se observa de la Tabla.3.3. que para el primer grupo la guitarra Pino presenta la mayor duración en la nota E3, de la misma manera que la guitarra Cedro2 en las notas E4, E5 y E6. La guitarra Pino tiene la mayor duración promedio de sonido, lo que corresponde a una mayor duración general del sonido. Contrario a esto se tiene que la guitarra Cedro1 tiene la menor duración promedio. De la misma manera, para el segundo grupo se observa que la guitarra Yamaha presenta la mayor duración en las notas E5 y E6. Sin embargo la guitarra

Alhambra tiene la mayor duración promedio de sonido, lo que corresponde a una mayor duración general del sonido. Además vale la pena resaltar que las guitarras Alvaro y Yamaha tienen una duración promedio comparable entre sí, y tiempos similares entre las diferentes notas. También es importante decir que estas dos guitarras cuentan con tapa de cedro, mientras que la guitarra Alhambra cuenta con tapa de pino.



a)



b)

Figura.3.3. Tiempo promedio vs Frecuencia, para a) el primer grupo, y b) el segundo grupo de guitarras. La línea continua en las figuras representa la regresión lineal de cada curva.

De los tiempos de duración en cada nota se calcula y se grafica la regresión lineal para cada guitarra buscando alguna tendencia con la pendiente. En la Tabla.3.4. se muestra la regresión lineal de las curvas de Tiempo del primer y segundo grupo de guitarras.

Tabla.3.4. Regresión lineal de las curvas de Tiempo del primer y segundo grupo de guitarras.

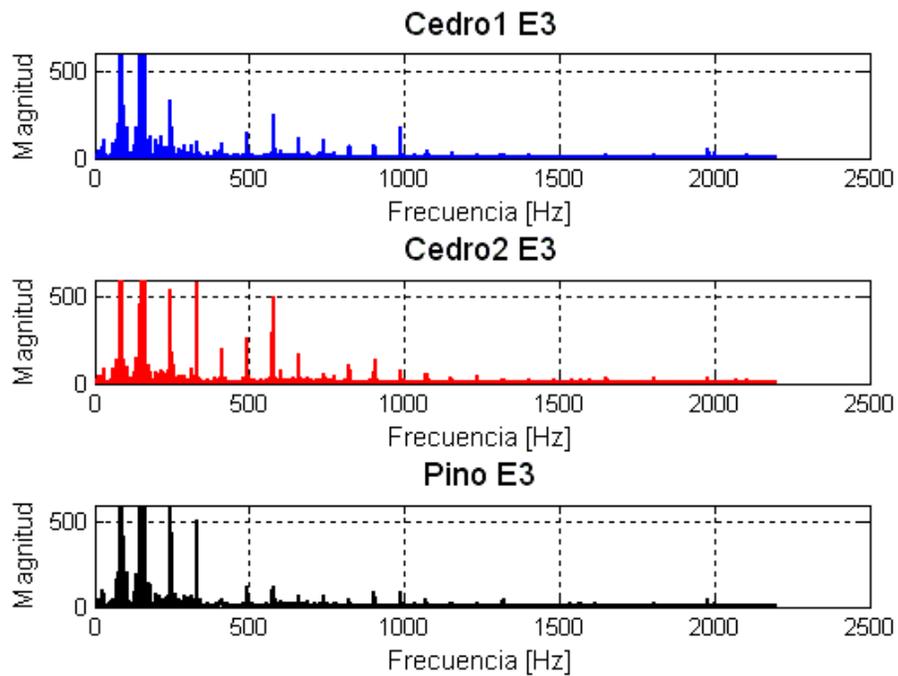
	Guitarra	Pendiente (m)	Corte eje vertical (b)
<b>Grupo 1</b>	<b>Cedro1</b>	-0.004384657	2.707626540
	<b>Cedro2</b>	<b>-0.004200695</b>	2.757219757
	<b>Pino</b>	-0.004864509	3.015583161
<b>Grupo 2</b>	<b>Alvaro</b>	-0.004160823	2.723083900
	<b>Yamaha</b>	<b>-0.004136121</b>	2.730348023
	<b>Alhambra</b>	-0.004950233	3.072664892

De la Tabla.3.4. se observa que para el primer grupo la guitarra Cedro2 presenta la menor pendiente seguida por la guitarra Cedro1. Así, la guitarra Cedro2 tiene la mayor homogeneidad en la duración del sonido. Para el segundo grupo de guitarras se observa que la guitarra Yamaha presenta la menor pendiente. Así, esta guitarra tiene la mayor homogeneidad en la duración del sonido. Las pendientes de las guitarras Alvaro y Yamaha son similares. Además, cabe notar que en los dos grupos de guitarras las pendientes son negativas y sus magnitudes varían a partir de la tercera cifra decimal.

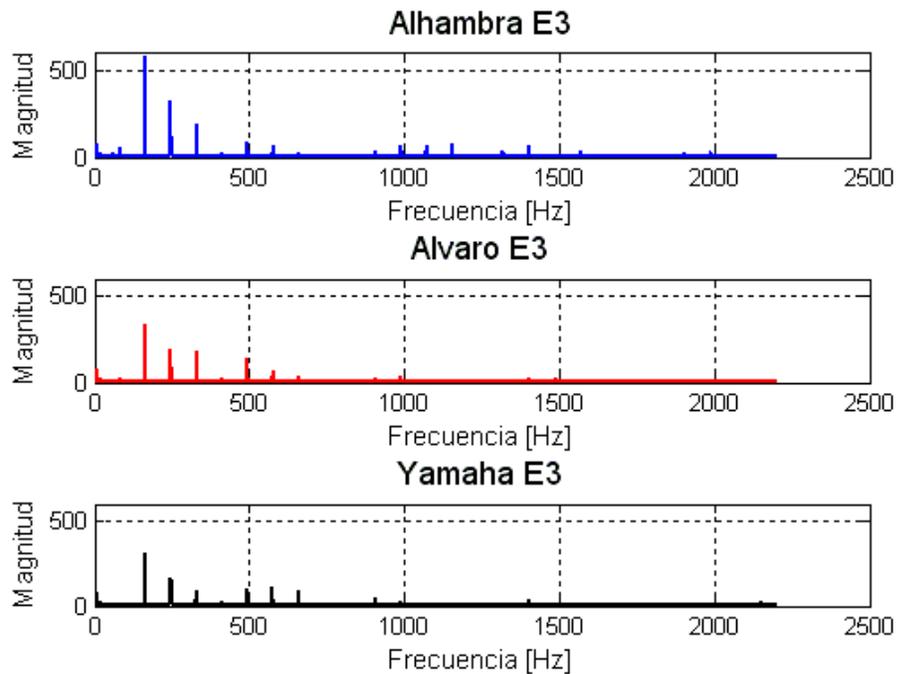
### **Análisis del timbre del sonido**

A continuación se presentan las gráficas correspondientes al espectro de frecuencia de la nota E3 para cada guitarra del primer y segundo grupo. Después de las gráficas se presenta una tabla correspondiente a la nota examinada y en seguida se muestra una nueva tabla en donde se resume la información presente en los espectros de todas las notas (E3, E4, E5 y E6); de estas tablas se extrae el número de armónicos presentes en cada nota de cada guitarra y se hace la respectiva comparación entre ellas. Para esto se tiene en cuenta que el sonido con mejores características tímbricas es aquel que cuenta con el mayor número de armónicos. Las gráficas y tablas correspondientes a las notas E4, E5 y E6 se pueden encontrar en el Anexo III.

La Figura.3.4. muestra el espectro de frecuencias de la nota E3 para cada guitarra a) del primer grupo y b) del segundo grupo. Se debe notar que la nota E3 tiene una frecuencia de aproximadamente 82 Hz, de esta manera se tienen armónicos en 82 Hz y múltiplos enteros de esta frecuencia.



a)



b)

Figura.3.4. Espectros de frecuencia correspondientes a la nota E3 para cada guitarra a) del primer grupo y b) del segundo grupo.

En la Tabla.3.5. se muestra los armónicos que están presentes en el espectro de frecuencias de la nota E3 en el primer y segundo grupo de guitarras.

Tabla.3.5. Armónicos y número de armónicos presentes en los espectros de la nota E3 de las guitarras del primer y segundo grupo de guitarras.

Frecuencia (Hz)	Grupo1			Grupo2		
	Cedro1	Cedro2	Pino	Alvaro	Yamaha	Alhambra
82	*	*	*	*	*	*
164	*	*	*	*	*	*
247	*	*	*	*	*	*
329	*	*	*	*	*	*
411	*	*	*	*	*	*
493	*	*	*	*	*	*
576	*	*	*	*	*	*
659	*	*	*	*	*	*
741	*	*	*		*	*
822	*	*	*		*	
906	*	*	*	*	*	*
988	*	*	*	*	*	*
1034	*	*	*	*		
1071	*	*	*	*		*
1151	*	*	*			*
1236	*	*	*			
1321	*	*	*		*	*
1403	*	*	*	*	*	*
1482		*	*	*		*
1570		*	*	*		*
1654	*	*	*			*
1803	*	*	*		*	*
1980	*	*	*			*
2068		*				*
2155				*	*	
Número de armónicos	21	<b>24</b>	23	16	16	<b>21</b>

De la Tabla.3.5. y de las tablas de los espectros de frecuencia (ver Anexo III) se observa que para el primer grupo, en la nota E3 la guitarra Cedro2 presenta el mayor número de armónicos, en la nota E4 las guitarras Cedro1 y Cedro2 muestran el mayor número de armónicos, en las notas E5 y E6 todas las guitarras tienen aproximadamente el mismo número de armónicos. Por otra parte, para el segundo grupo de guitarras se observa que en la nota E3 la guitarra Alhambra presenta el mayor número de armónicos, en la nota E4 la guitarra Alvaro presenta el mayor número de armónicos, en la nota E5 las guitarras Alhambra y Alvaro tienen el mayor número de armónicos, y en la nota E6 es la guitarra Alhambra la que presenta el mayor número de armónicos. Esto se muestra en la Tabla.3.6.

de manera que se resume la información sobre la cantidad de armónicos presentes en todas las notas analizadas de cada guitarra del primer y segundo grupo.

Tabla.3.6. Guitarras del primer y segundo grupo y su correspondiente total de armónicos: Número de armónicos presentes en las respectivas notas.

Guitarra Nota	Grupo1			Grupo2		
	Cedro1	Cedro2	Pino	Alvaro	Yamaha	Alhambra
<b>E3</b>	21	24	23	16	16	21
<b>E4</b>	16	15	14	14	13	11
<b>E5</b>	11	11	10	7	6	6
<b>E6</b>	7	7	8	4	3	5
<b>Total</b>	55	<b>57</b>	55	41	38	<b>43</b>

De la Tabla.3.6.se observa que para el primer grupo la guitarra Cedro2 tiene la mayor riqueza tímbrica, esto ya que cuenta con el mayor número de armónicos en 3 de las 4 notas estudiadas. También se debe considerar que las guitarras Cedro1 y Pino tienen un número de armónicos muy cercano al de la guitarra Cedro2. En general se observa que todas las guitarras presentan espectros de frecuencias similares, es decir, no existe mucha diferencia en cantidad de armónicos presentes en cada guitarra; con respecto a esto se resalta el hecho de que todas las guitarras del primer grupo provienen del mismo constructor (Luthier Jorge Noguera). De otra manera, para el segundo grupo se observa que la guitarra Alhambra tiene la mayor riqueza tímbrica, esto ya que cuenta con el mayor número de armónicos en 2 de las 4 notas estudiadas. Además de esto, existe una cercanía en la cantidad de armónicos entre las notas de las guitarras Alvaro y Yamaha.

### 3.4. Discusión

De los datos obtenidos se puede ver que en el primer grupo la guitarra con madera de pino tiene mayor intensidad de sonido y que las de cedro tienen mayor homogeneidad. De la misma manera, en el segundo grupo la guitarra con madera de pino (Alhambra) tiene mayor intensidad sonora y las de cedro tienen mayor homogeneidad. Esto se nota particularmente, ya que al observar nota a nota no hay mucha diferencia entre las guitarras Alvaro y Yamaha. Y como se esperaba, los tonos graves duran más tiempo que los agudos. Esto ocurre debido a que las notas agudas tienden a apagarse más rápido debido a su alta frecuencia, además la caja de la guitarra tiene su frecuencia de resonancia en las frecuencias bajas y de esta manera siempre se tendrá la tendencia a amplificar en mayor medida las notas graves haciendo que perduren mucho más.

En el análisis del timbre se observa que para un mismo armónico cada guitarra presenta un nivel determinado. Así, cuando se toca una nota particular, el espectro de la cuerda es transformado fundamentalmente por la respuesta que el puente y la tapa tienen de manera general, y es este espectro transformado y traducido a sonido el que emite la guitarra. Así, el primero, segundo, tercero, etc., armónicos de la cuerda serán modificados cada uno

según la zona de la curva de respuesta de la guitarra en que ocurra. En la Figura.3.5. se muestra el efecto de esta transformación, las resonancias actúan como filtros para el espectro original de la cuerda y dan por resultado el sonido emitido por la guitarra. En la imagen se muestra primero un espectro de una nota particular que excita la guitarra, luego se observa una gráfica representativa de la guitarra como filtro pasabanda, y finalmente el espectro de la nota filtrada por la guitarra.

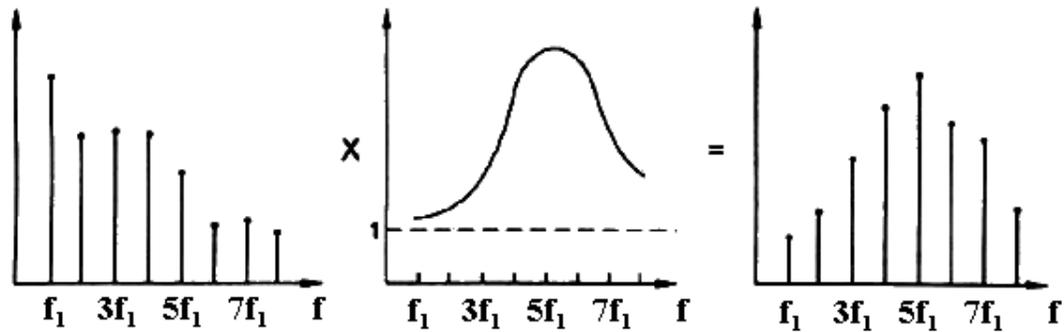


Figura.3.5. Efecto de filtrado de la señal original (dada por la cuerda) por parte de la tapa y el cuerpo de la guitarra. [9]

En este capítulo se analizó el sonido para guitarras construidas con tapas de pino y de cedro; en general se observó que las guitarras con madera de pino tienen mayor intensidad de sonido y que las de cedro tienen mayor homogeneidad. En el siguiente capítulo se analizará qué relación existe entre el sonido, la vibración en la tapa armónica y los materiales con que se construye.

## CAPÍTULO 4: CORRELACIÓN ENTRE EL SONIDO Y LAS VIBRACIONES DE LA TAPA

En este capítulo se estudiará en primera instancia el concepto de vibración, la vibración en una cuerda y en una membrana rectangular, seguido por el sistema para la medición de las vibraciones; luego se encontrará una breve descripción del coeficiente de correlación y finalmente una explicación de la manera como se capturaron y se analizaron los datos experimentales de la vibración de las tapas armónicas.

### 4.1. Vibración

Se dice que un cuerpo vibra cuando experimenta cambios alternativos, de tal modo que sus puntos oscilen sincrónicamente en torno a sus posiciones de equilibrio, sin que ellos cambien de lugar. Además se puede decir que la vibración es un intercambio de energía cinética en cuerpos con rigidez y masa finitas, el cual surge de una entrada de energía dependiente del tiempo.

#### 4.1.1. Ondas transversales en cuerdas

##### 4.1.1.1. Cuerda vibrante

Considere una cuerda fuertemente tensa entre dos puntos fijos,  $x = 0$  y  $x = L$  en el eje  $x$  de la Figura.4.1. En el tiempo  $t = 0$  la cuerda se desplaza en el punto medio una distancia  $h$ . Luego la cuerda se suelta.

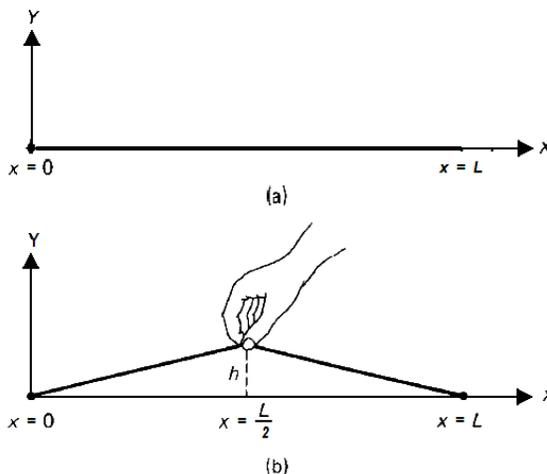


Figura.4.1. (a) Cuerda fuertemente tensa entre dos puntos fijos. (b) Desplazamiento de la cuerda en el tiempo  $t = 0$ . [10]

Se asume que la cuerda es perfectamente flexible y elástica, y que  $h$  es pequeño comparado con  $L$ . En algún tiempo  $t$ , la cuerda tiene la forma que se muestra en la Figura.4.2.  $Y(x, t)$  es el desplazamiento del punto  $x$  en la cuerda (medido desde la posición de equilibrio, la cual se toma como el eje  $x$ ) en el tiempo  $t$ . El desplazamiento, en el tiempo  $t$ , en el punto vecino  $x + \Delta x$  estará dado entonces por  $Y(x + \Delta x, t)$ .

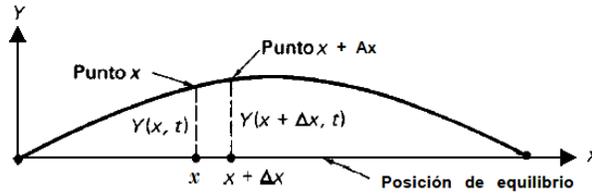


Figura.4.2. Forma de la cuerda adquirida en el tiempo  $t$ . [10]

Para describir el movimiento resultante, considere las fuerzas que actúan sobre el pequeño elemento de cuerda de longitud  $\Delta s$  entre  $x$  y  $x + \Delta x$ , en la Figura.4.3. se muestra dicho elemento. Habrá dos fuerzas actuando sobre el elemento, la tensión  $\tau(x)$  debida a la porción de cuerda a la izquierda, y la tensión  $\tau(x + \Delta x)$  debida a la porción a la derecha. Se ha asumido por el momento que la tensión depende de la posición. Descomponiendo estas fuerzas se obtiene:

$$\text{fuerza neta vertical (hacia arriba)} = \tau(x + \Delta x) \sin \theta_2 - \tau(x) \sin \theta_1 \quad (4.1)$$

$$\text{fuerza neta horizontal (a la derecha)} = \tau(x + \Delta x) \cos \theta_2 - \tau(x) \cos \theta_1 \quad (4.2)$$

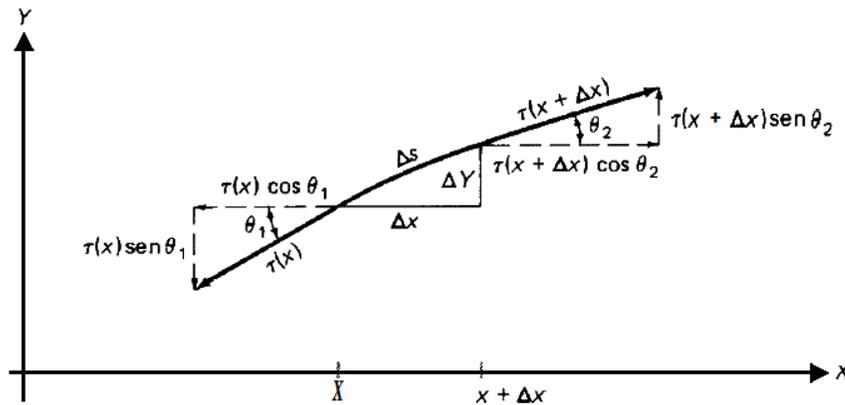


Figura.4.3. Elemento de cuerda de longitud  $\Delta s$  entre  $x$  y  $x + \Delta x$ . [10]

Se asume ahora que no hay movimiento a la izquierda ni a la derecha de la cuerda, esto es, a un alto grado de aproximación la fuerza neta horizontal es cero. La fuerza vertical neta en las expresiones anteriores produce una aceleración del elemento. Asumiendo que la cuerda tiene densidad  $\rho$ , la masa del elemento es  $\rho \Delta s$ . La aceleración vertical de la cuerda está aproximadamente dada por  $\partial^2 Y / \partial t^2$ . De donde por la segunda ley de Newton se tiene:

$$\tau(x + \Delta x)\text{sen}\theta_2 - \tau(x)\text{sen}\theta_1 = \rho\Delta s \frac{\partial^2 Y}{\partial t^2} \quad (4.3)$$

Si  $\theta$  es el ángulo que forma la tangente en cualquier punto del elemento con el eje positivo  $x$ , entonces  $\theta$  es una función de la posición y se escribe  $\theta_1 = \theta(x)$ ,  $\theta_2 = \theta(x + \Delta x)$ .

Sustituyendo en la ecuación (4.3) y dividiendo por  $\Delta x$  se tiene:

$$\frac{\tau(x + \Delta x)\text{sen}\theta(x + \Delta x) - \tau(x)\text{sen}\theta(x)}{\Delta x} = \rho \frac{\Delta s}{\Delta x} \frac{\partial^2 Y}{\partial t^2} \quad (4.4)$$

De la ecuación (4.4) se tiene que la pendiente de la recta tangente en cualquier punto de la cuerda está dada por:

$$\tan\theta(x) = \frac{\partial Y}{\partial x} \quad (4.5)$$

de modo que:

$$\text{sen}\theta(x) = \frac{\partial Y / \partial x}{\sqrt{1 + (\partial Y / \partial x)^2}} \quad (4.6)$$

Si se asume que la pendiente es pequeña comparada con 1, se puede despreciar  $(\partial Y / \partial x)^2$  en el denominador de la ecuación (4.6), lo que equivale a:

$$\text{sen}\theta(x) = \tan\theta(x) = \frac{\partial Y}{\partial x} \quad (4.7)$$

Utilizando la ecuación (4.7) en la ecuación (4.4) y tomando el límite cuando  $\Delta x \rightarrow 0$ , entonces la ecuación (4.4) se convierte en:

$$\frac{\partial}{\partial x} [\tau(x)\tan\theta(x)] = \rho \frac{\partial^2 Y}{\partial t^2} \quad (4.8)$$

o

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \tau(x) \frac{\partial Y}{\partial x} \right] = \rho \frac{\partial^2 Y}{\partial t^2} \quad (4.9)$$

A la ecuación (4.9) se le llama ecuación de la cuerda vibrante. En el caso particular en que  $\tau(x) = \tau$ , entonces se tiene:

$$\tau \frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial^2 Y}{\partial t^2} \quad (4.10)$$

#### 4.1.1.2. Condiciones de frontera

Puesto que la cuerda está fija en los puntos  $x = 0$  y  $x = L$ , se tiene:

$$Y(0, t) = 0, \quad Y(L, t) = 0 \quad \text{para } t \geq 0$$

Así, se establece que los desplazamientos en los extremos son siempre cero. De la Figura.4.1. b) se deduce que:

$$Y(x, 0) = \begin{cases} \frac{2hx}{L}, & 0 \leq x \leq \frac{L}{2} \\ \frac{2h}{L}(L - x), & \frac{L}{2} \leq x \leq L \end{cases} \quad (4.11)$$

$Y(x, 0)$  denota el desplazamiento en cualquier punto  $x$  en  $t = 0$ . Además, como la cuerda se suelta desde el reposo, su velocidad inicial en cualquier parte es cero, esto es  $\partial Y / \partial t_{t=0} = 0$

#### 4.1.1.3. Modos de vibración en una cuerda

Cuando una cuerda tiene fijo uno de sus extremos y en el otro se hace un movimiento armónico, o bien una cuerda sujeta por ambos extremos a la que se perturba desde un punto intermedio, a través de ella se tiene una propagación de ondas estacionarias.

En una cuerda el primer modo resonante ocurrirá cuando la frecuencia de vibración haga que la longitud de la onda que se genere sea igual al doble de la longitud  $L$  de la cuerda. Este es el llamado modo fundamental, también llamado primer armónico. El segundo modo resonante ocurrirá cuando la frecuencia de vibración haga que la longitud de la onda que se genere sea igual a la longitud de la cuerda. Y el tercer modo resonante ocurrirá cuando la frecuencia de vibración haga que la longitud de la onda que se genere sea igual dos tercios de la longitud de la cuerda. En general el  $n$ -ésimo modo de resonancia se genera cuando la longitud de onda del movimiento es  $2L/n$ , donde  $n$  pertenece a los enteros mayores o iguales que uno. En la Figura.4.4. se muestran los 4 primeros modos de vibración en una cuerda.

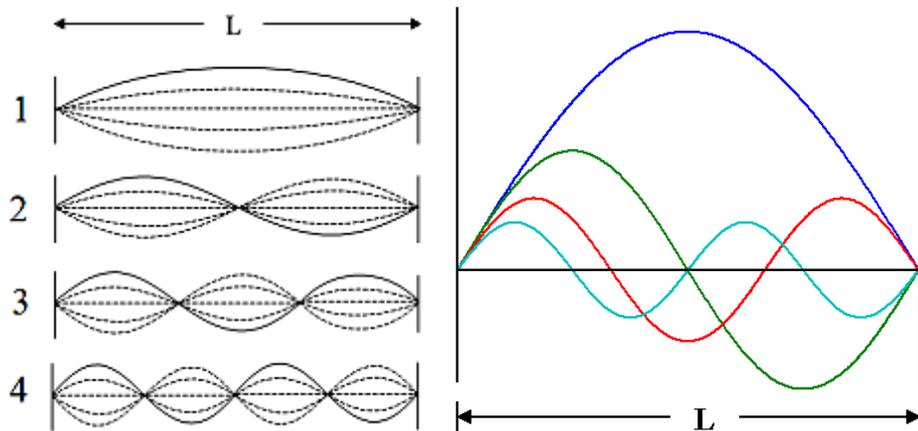


Figura.4.4. Cuatro primeros modos de vibración en una cuerda.

Sumando o superponiendo todos los armónicos o modos de vibración se obtiene la auténtica vibración de la cuerda fija en ambos extremos. En la Figura.4.5. se muestra la vibración de la cuerda, producto de la superposición de todos los armónicos. En el Anexo IV se proporciona información acerca de las vibraciones de las cuerdas en los instrumentos musicales de cuerda pulsada.

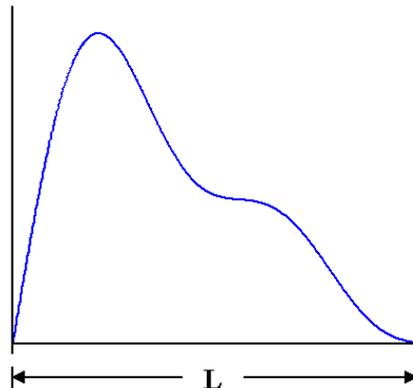


Figura.4.5. Vibración de la cuerda: superposición de todos los armónicos.

#### 4.1.2. Ecuación de onda de una membrana rectangular

El sistema bidimensional más simple que se puede considerar es una membrana rectangular con dimensiones  $L_x$  y  $L_y$ , con bordes fijos, y con una tensión superficial  $T$  que es constante en cada punto.

Considere un elemento con densidad de área  $\sigma$ , como se muestra en la Figura.4.6. Este ha sido desplazado una distancia pequeña  $dz$ , y la tensión superficial  $T$  actúa para llevarlo al punto de equilibrio. Las fuerzas que actúan sobre los bordes  $dx$  tienen magnitud  $Tdx$ , y sus componentes verticales son  $-T \sin(\alpha)dx$  y  $-T \sin(\beta)dx$ . Para  $\alpha$  y  $\beta$  pequeños.

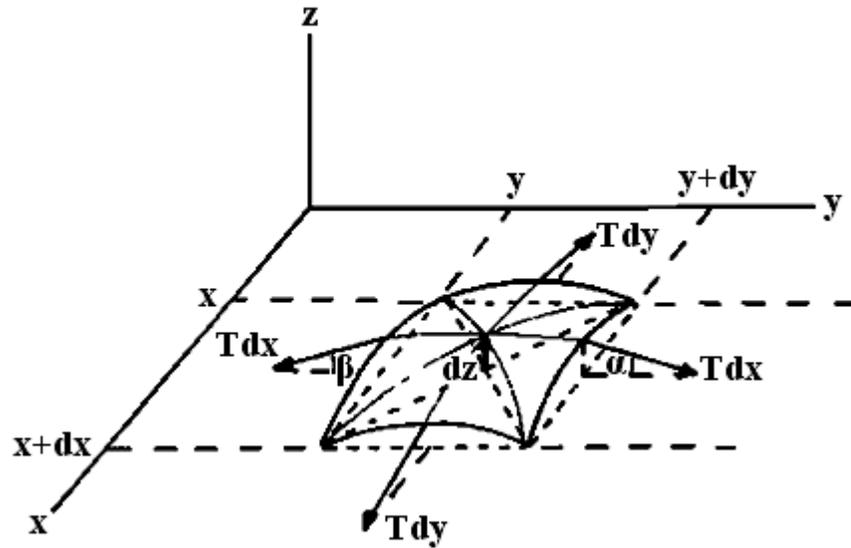


Figura.4.6. Fuerzas sobre un elemento de membrana rectangular. [13]

$$\text{sen}\alpha \approx \text{tan}\alpha = \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)_{y+dy} \quad (4.12)$$

$$\text{sen}\beta \approx \text{tan}\beta = \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)_y \quad (4.13)$$

por esto,

$$F_y = -Tdx \left[ \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)_{y+dy} - \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)_y \right] = -Tdx \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} dy \quad (4.14)$$

Similarmente, la componente vertical de las fuerzas actuando sobre los bordes  $dy$  es:

$$F_x = -Tdy \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} dx \quad (4.15)$$

La fuerza total de restauración sobre el elemento  $dx dy$  es  $F = F_x + F_y$ , de modo que la ecuación de movimiento  $F = ma$  se convierte en:

$$Tdx dy \left( \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right) = \sigma dx dy \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} \quad (4.16)$$

o

$$\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = \frac{T}{\sigma} \left( \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right) = c^2 \nabla^2 z \quad (4.17)$$

Esta es una ecuación de onda para una onda transversal con una velocidad  $c = \sqrt{\frac{T}{\sigma}}$ . Esta se resuelve escribiendo la amplitud  $z(x, y, t)$  como un producto de tres funciones, cada una de una variable única  $z(x, y, t) = X(x)Y(y)T(t)$ . Las segundas derivadas son:

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = \frac{d^2 X}{dx^2} Y T$$

$$\frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = \frac{d^2 Y}{dy^2} X T$$

$$\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = \frac{d^2 T}{dt^2} X Y$$

De modo que la ecuación se convierte en:

$$\frac{1}{T} \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} = \frac{c^2}{X} \frac{d^2 X}{dx^2} + \frac{c^2}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2} \quad (4.18)$$

Esta ecuación se cumple sólo si cada lado de la ecuación es constante, la que se denotará como  $-\omega^2$ . Esto proporciona dos ecuaciones:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + \omega^2 T = 0 \quad (4.19)$$

con soluciones  $T(t) = E \sin(\omega t) + F \cos(\omega t)$ , y

$$\frac{1}{X} \frac{d^2 X}{dx^2} + \frac{\omega^2}{c^2} = -\frac{1}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2} \quad (4.20)$$

Vale la pena notar que la ecuación 4.19 tiene la forma de la ecuación diferencial del movimiento armónico simple, de esta manera, para la cuerda vibrante se tiene que las partículas que la componen presentan este tipo de movimiento.

Retomando, de la ecuación 4.20, cada lado debe ser constante, en este caso se denota por  $k^2$ . Esto proporciona:

$$\frac{d^2 X}{dx^2} + \left( \frac{\omega^2}{c^2} - k^2 \right) X = 0 \quad (4.21)$$

con soluciones

$$X(x) = A \operatorname{sen} \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - k^2} x + B \operatorname{cos} \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - k^2} x$$

y

$$\frac{d^2 Y}{dy^2} + k^2 Y = 0 \quad (4.22)$$

con soluciones  $Y(y) = C \operatorname{sen}(ky) + D \operatorname{cos}(ky)$ .

#### 4.1.2.1. Condiciones de frontera

Para una membrana rectangular de dimensiones  $L_x$  por  $L_y$ , fija en sus cuatro lados, las condiciones de frontera exigen que  $z = 0$  para  $x = 0$ ,  $x = L_x$ ,  $y = 0$ , y  $y = L_y$ , de la primera condición, se observa que  $B = 0$ ; de la segunda,

$$A \operatorname{sen} \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - k^2} L_x = 0 \quad (4.23)$$

de modo que

$$A \operatorname{sen} \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - k^2} L_x = m\pi \quad (4.24)$$

y

$$X(x) = A \operatorname{sen} \frac{m\pi x}{L_x} \quad (4.25)$$

con  $m = 1, 2, \dots$ . Desde el tercero,  $D = 0$ ; y desde el cuarto,  $C \operatorname{sen} k L_y = 0$ , así:

$$k L_y = n\pi$$

y

$$Y(y) = C \operatorname{sen} \left( \frac{n\pi}{L_y} \right) y \quad (4.26)$$

con  $n = 1, 2, \dots$ .

Debido a esto,

$$z_{mn} = A \operatorname{sen} \frac{m\pi x}{L_x} C \operatorname{sen} \frac{n\pi y}{L_y} (E \operatorname{sen}(\omega t) + F \operatorname{cos}(\omega t)) \quad (4.27)$$

$$z_{mn} = \operatorname{sen} \frac{m\pi x}{L_x} \operatorname{sen} \frac{n\pi y}{L_y} (M \operatorname{sen}(\omega t) + N \operatorname{cos}(\omega t)) \quad (4.29)$$

Para determinar las frecuencias modales se debe resolver para  $\omega$ :

$$\sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - k^2} = \frac{m\pi}{L_x} \quad (4.30)$$

esto es:

$$\omega^2 = \left(\frac{m\pi}{L_x}\right)^2 c^2 + k^2 c^2 = \left(\frac{m\pi}{L_x}\right)^2 c^2 + \left(\frac{n\pi}{L_y}\right)^2 c^2 \quad (4.31)$$

Y

$$f_{mn} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{T}{\sigma}} \sqrt{\frac{m^2}{L_x^2} + \frac{n^2}{L_y^2}} \quad (4.32)$$

con  $m, n = 1, 2, \dots$

La posición de las ondas en la dirección  $x$  aparecen independientemente de la posición de las ondas en la dirección  $y$ . Algunos de los modos de una membrana rectangular que tiene fijos sus cuatro lados se ilustran en la Figura.4.7.

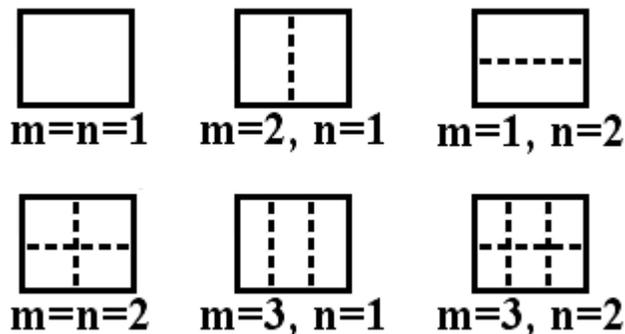


Figura.4.7. Algunos modos normales de una membrana rectangular. [13]

### 4.1.3. Medición de Vibración

La medición de la vibración se puede definir como el estudio de las oscilaciones mecánicas de un sistema dinámico. Esto puede hacerse de manera óptica o mecánica, en cualquier caso, se requiere un sistema de medición y procesamiento por computador. [14]

Un sistema de medición y procesamiento de señales de vibración típico por computadora, está formado por (ver Figura.4.8.):

- a. Los transductores de vibraciones (Acelerómetros, LVDTs, Sondas de Corriente Eddy) los cuales son los encargados de transformar las vibraciones en señales eléctricas.
- b. Un sistema de acondicionamiento de señal, el cual se encarga de recoger las diferentes señales, amplificarlas y llevarlas a los niveles de tensión aceptados por el sistema de adquisición de datos.
- c. La tarjeta de adquisición de datos, la cual se encarga de digitalizar la señal, realizando para ello, un muestreo discreto de la señal analógica proveniente del acondicionamiento de señal, y de introducirla al computador donde se realizan diferentes tipos de procesamiento para obtener toda la información que se requiere para el análisis y monitoreo de las vibraciones de las máquinas.



Figura.4.8. Sistema de Monitoreo y Control de Vibración en Computadora, a través de Transductores, Acondicionamiento de Señal y una tarjeta de Adquisición de datos.

### Transductores de medición de vibración

Los transductores de vibración son empleados para medir la velocidad lineal, desplazamiento, proximidad, y también la aceleración de sistemas sometidos a vibración. En general, los transductores empleados en el análisis de vibración, convierten la energía mecánica en energía eléctrica, lo que significa que producen una señal eléctrica la cual está en función de la vibración. Además, los transductores de vibración pueden tener de uno a tres ejes de medición, siendo estos ejes ortogonales.

## Adquisición de datos

Para la adquisición de datos se utiliza un sistema de acondicionamiento de señal, el cual se encarga de recoger las diferentes señales, amplificarlas y llevarlas a los niveles de tensión aceptados por el sistema de adquisición. Para la adquisición se utiliza un circuito que se encarga de digitalizar la señal, realizando para ello, un muestreo discreto de la señal analógica proveniente del acondicionamiento de señal, y de introducirla al computador, donde se realizan diferentes tipos de procesamiento para obtener toda la información que se requiere para el análisis de la vibración.

## Análisis por computador

Para el análisis de las vibraciones se utilizan técnicas matemáticas y computacionales que permiten extraer la información de las señales físicas adquiridas. Entre estas técnicas se pueden mencionar transformada de Fourier y el filtrado digital de señales.

### 4.2. Análisis de vibraciones y sonido

Para el análisis siguiente se muestra en primera medida una serie de imágenes (correspondientes a la nota E3 de la guitarra Cedro1 y Alhambra del primer y segundo grupo de guitarras respectivamente) en las que se expone en primera medida las señales de vibración y sonido correspondientes y sus respectivas sumas acumulativas de sus energías, en segunda instancia se muestra la correlación cruzada normalizada de las sumas acumulativas de las señales de sonido y vibración, y finalmente los coeficientes de correlación de las sumas acumulativas de las señales de sonido y vibración. Posteriormente se resume en tablas la información contenida en las gráficas. Las gráficas correspondientes a las notas E4, E5, y E6 para las guitarras Cedro1 y Alhambra y las de las demás guitarras del primer y segundo grupo se muestran en el Anexo IV.

#### 4.2.1. Coeficiente de correlación lineal

El coeficiente de correlación lineal para dos variables discretas  $x$  e  $y$  está dado por [15]:

$$\rho_{xy} = \frac{\sum_i (x_i - x_m)(y_i - y_m)}{\sqrt{\sum_i (x_i - x_m)^2} \sqrt{\sum_i (y_i - y_m)^2}} \quad (4.33)$$

El valor de  $\rho_{xy}$  está comprendido entre +1 y -1. El valor +1 significa un 100% de correlación, mientras que -1 significa un 100% de correlación en oposición de fase. Un valor cero significa que no existe correlación y por lo tanto las dos variables son completamente independientes. Este es el caso, por ejemplo, si una de las variables fuese completamente aleatoria. Pequeños valores de  $\rho_{xy}$  indican poca correlación.

### 4.3. Recolección de datos

Para el análisis vibracional se contó con un sistema de seis acelerómetros, para capturar las vibraciones de la tapa armónica; con el fin de tener una pulsación uniforme, se utilizó un servomotor con contaba con un plectro en su eje; una tarjeta Arduino Uno para la adquisición de datos, control del servomotor e interfaz con un computador; ésta interfaz se realizó a través del software Labview.

Se utilizó un servomotor MG995 (Figura.4.9.) con un torque de  $8.5Kg$  (polarizado a  $4.8V$ ), de tal manera que el algoritmo sincronizaba la pulsación de las cuerdas y la adquisición de datos. Los datos obtenidos fueron visualizados y procesados en Matlab. En la Figura.4.9. se muestra el servomotor y la ubicación de éste en el montaje experimental.

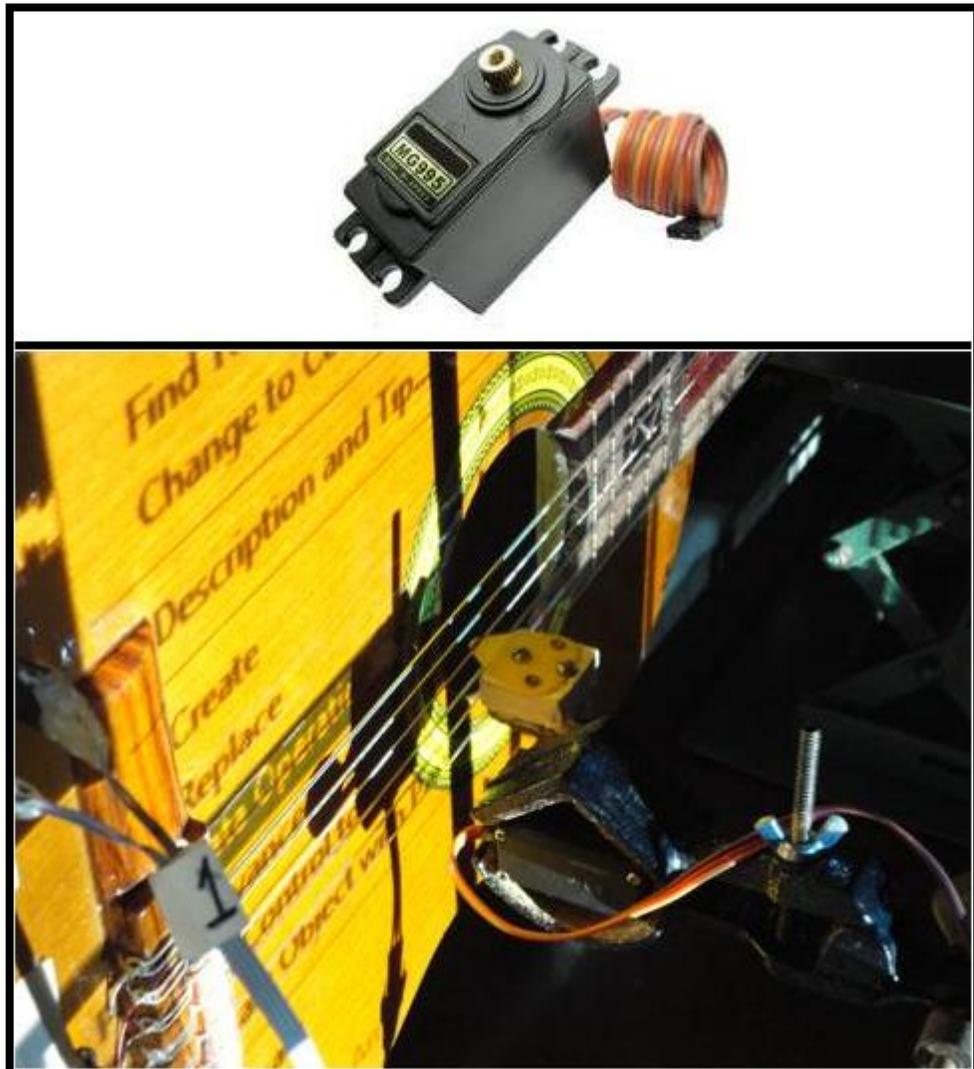


Figura.4.9. Servomotor utilizado y su ubicación en el montaje experimental.

Para captar la vibración se utilizaron acelerómetros MMA7361 (Figura.4.10.), lo cuales cuentan con una sensibilidad de hasta  $\pm 1.5g$  y  $800mV/g$ .

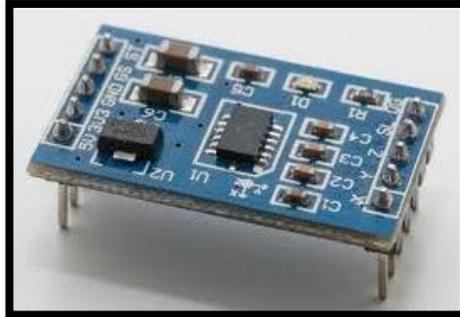


Figura.4.10. Acelerómetro MMA7361.

La ubicación de los acelerómetros en la tapa se realizó por medio de la proyección de una plantilla, en la cual se indica la posición y número de acelerómetro y número de medida. La posición hace referencia a la posición física del sensor con respecto a la tapa; como sólo se contaba con seis sensores y se deseaba realizar medidas en 54 puntos específicos, se debieron realizar 10 medidas diferentes con diferentes ubicaciones para los sensores, evitando siempre que estos estuviesen muy cerca entre si, evitando de ésta manera interferir de forma significativa en las vibraciones presentes en la tapa. En las figuras siguientes se muestra la plantilla utilizada y la proyección realizada sobre la guitarra Alhambra.

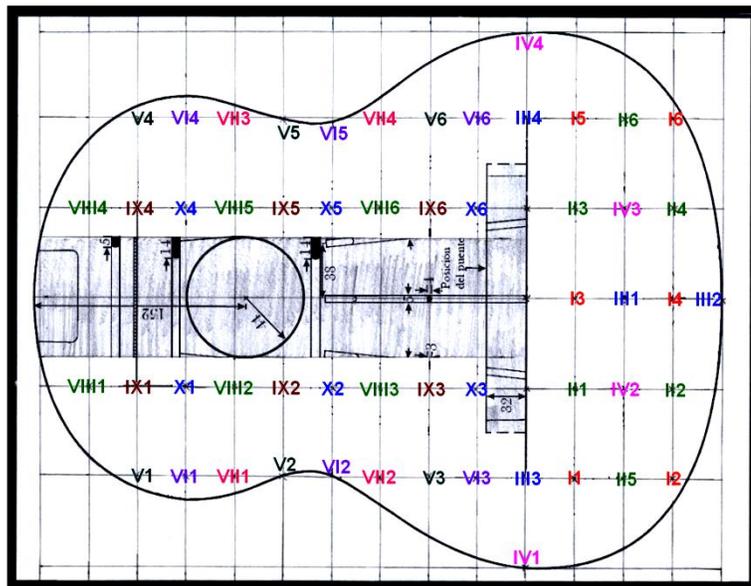
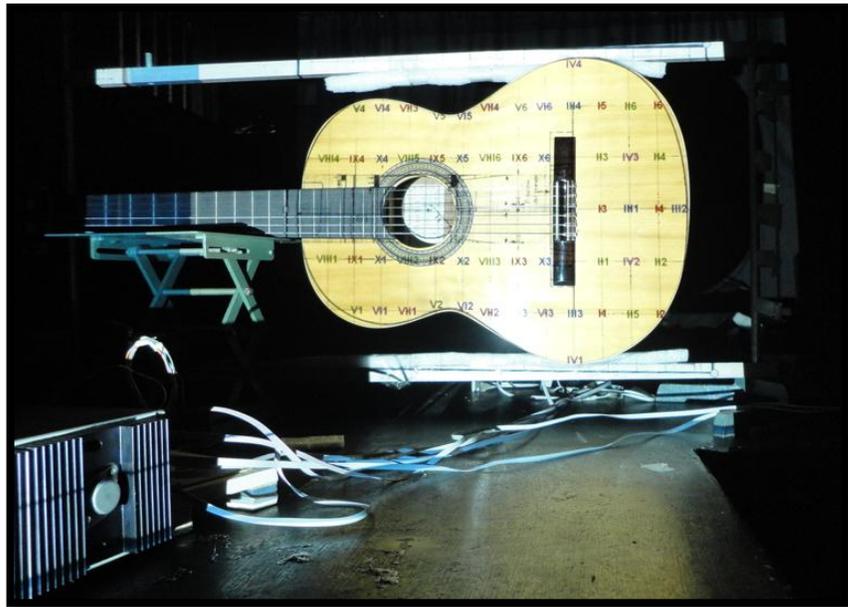
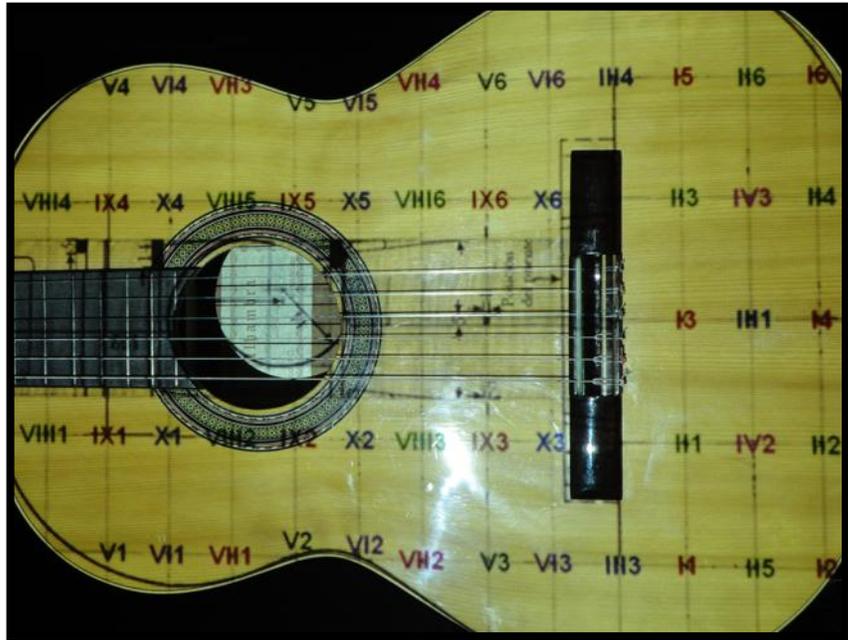


Figura.4.11. Plantilla utilizada para la proyección en las pruebas de vibración.



a)



b)

Figura.4.12. a) Montaje general utilizado en las pruebas de vibración. b) Proyección realizada sobre la guitarra Alhambra.

Como tarjeta de adquisición se utilizó un Arduino Uno (Figura.4.13.), del cual se tomó 6 canales analógicos (uno para cada acelerómetro).

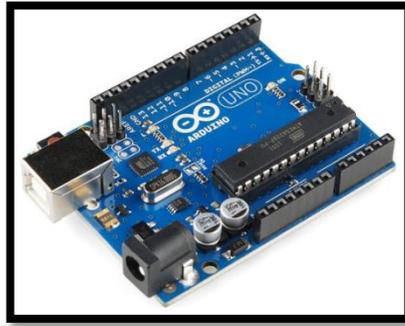


Figura.4.13. Arduino Uno utilizado como tarjeta de adquisición.

#### 4.4. Análisis de datos

Para el análisis siguiente se muestra la amplitud promedio de vibración, que representa el promedio de la vibración en todos los puntos medidos en la tapa en cada instante de tiempo, la intensidad de sonido y las sumas acumulativas de las energías de sus respectivas señales, de tal manera que se desea encontrar la correlación entre ellas, esto es el grado de similitud que existe entre la suma acumulativa de las energías de cada señal. Además de esto sólo se considera los primeros 6 segundos de cada señal con el fin de minimizar el efecto del ruido presente en las señales de sonido de las guitarras del primer grupo.

La Figura.4.14. muestra las señales de vibración y sonido y sus respectivas sumas acumulativas de sus energías para la nota E3 a) en la guitarra Cedro1, del primer grupo, y b) en la guitarra Alhambra, del segundo grupo.

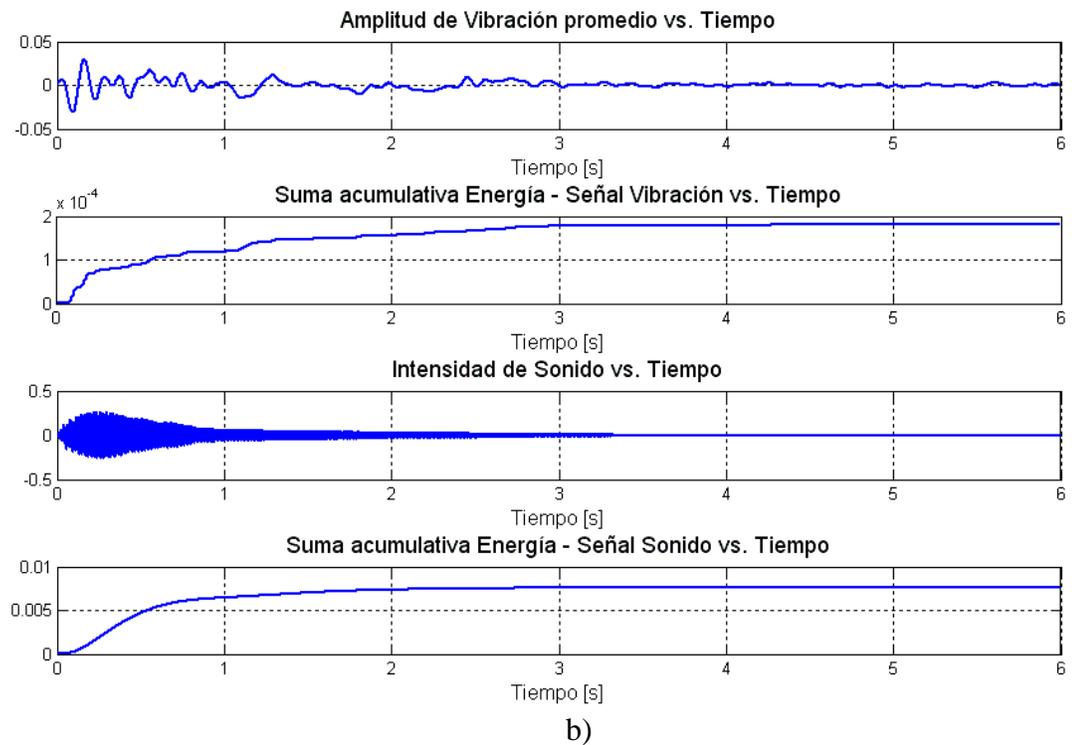
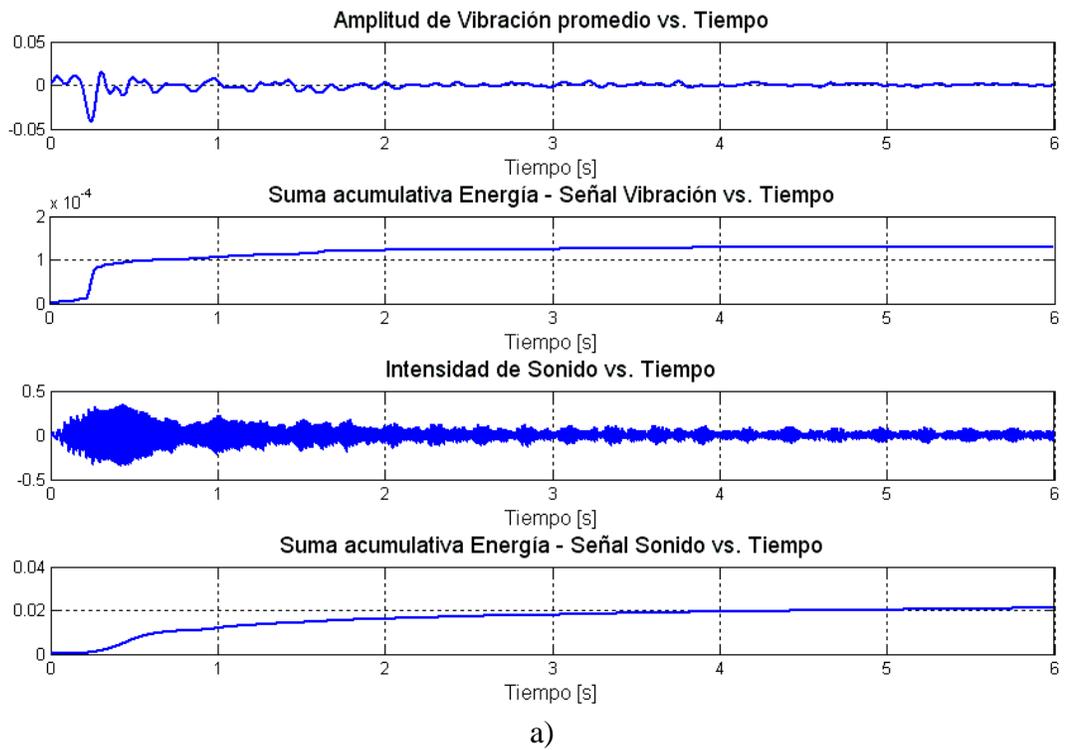


Figura.4.14. Señales de vibración y sonido y sus respectivas sumas acumulativas de sus energías para la nota E3 a) en la guitarra Cedrol1, y b) en la guitarra Alhambra.

De la Figura.4.14. se observa que, ignorando el orden de magnitud, las sumas acumulativas de las energías de las señales tienen formas similares. Además es notorio que los máximos de vibración coinciden tanto en la señal de sonido como en la de vibración.

La Figura.4.15. muestra la correlación cruzada normalizada y los coeficientes de correlación de las sumas acumulativas de las señales de sonido y vibración para la nota E3 a) en la guitarra Cedro1, del primer grupo, y b) en la guitarra Alhambra, del segundo grupo.

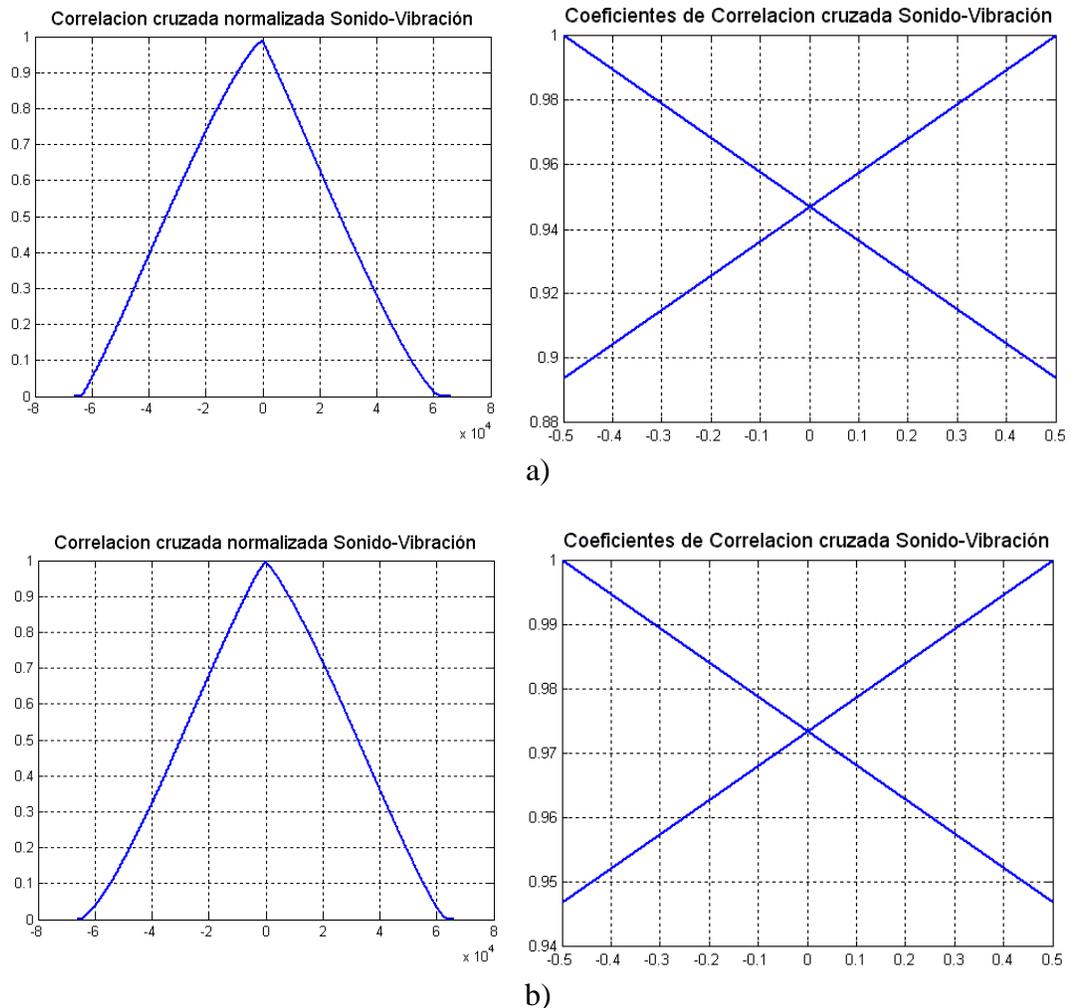


Figura.4.15. Correlación cruzada normalizada y coeficientes de correlación de las sumas acumulativas de las señales de sonido y vibración para la nota E3 a) en la guitarra Cedro1, y b) en la guitarra Alhambra.

De la Figura.4.15. se resalta el hecho que la forma de la correlación es triangular con pico en cero. De la misma manera, de los coeficientes de correlación se puede afirmar que las señales se parecen entre si y que están fuertemente correlacionados.

De las figuras anteriores y de las que se encuentran en el Anexo V se observa que tanto para el primer como para el segundo grupo de guitarras hay un alto grado de correlación entre las sumas acumulativas de energía y de vibración. En las tablas siguientes se muestra de forma resumida la información contenida en estas figuras.

En la Tabla.4.1. se presenta la correlación para todas las notas de cada guitarra del primer y segundo grupo.

Tabla.4.1. Correlación para todas las notas de cada guitarra del primer y segundo grupo.

	Nota	E3	E4	E5	E6
	Guitarra				
<b>Grupo1</b>	<b>Cedro1</b>	0.9469	0.9771	0.9610	0.9494
	<b>Cedro2</b>	0.9160	0.9708	0.9826	0.8775
	<b>Pino</b>	0.9562	0.9822	0.8823	0.8177
<b>Grupo2</b>	<b>Alvaro</b>	0.9509	0.9919	0.9937	0.9841
	<b>Yamaha</b>	0.9402	0.9976	0.9654	0.9740
	<b>Alhambra</b>	0.9735	0.9906	0.9227	0.9089

De la Tabla.4.1. se puede afirmar que hay un alto grado de correlación entre la vibración y el sonido para todas las guitarras que componen los dos grupos de guitarras. Además, se observa que el valor mínimo es 0.8177 (Primer grupo) y el valor máximo 0.9976 (Segundo grupo). Así, se encuentra una similitud considerable entre la suma acumulativa de las energías entre las señales de energía y de sonido. Esto permite afirmar que, como se esperaba, hay una dependencia entre las señales de vibración y sonido para todas las muestras tomadas.

#### 4.5. Relación entre el tipo de material y el sonido

Para este análisis se utilizaron vectores de densidad, módulo de Young, y razón de Poisson que corresponden a las propiedades físicas del sistema; estos vectores contienen 3 elementos para el primer y segundo grupo. Para las salidas se crearon vectores de energías promedio (volumen), tiempos promedio (duración), número de armónicos (timbre), pendientes de energías (homogeneidad volumen), pendientes de tiempos (homogeneidad duración), y energías promedio de vibración (amplitud vibración). En la Figura.4.16. se muestra el esquema general de la visualización del sistema con sus entradas y salidas. Con los vectores de propiedades y salida se procedió a calcular la correlación entre ellos. En las tablas siguientes se resume los datos obtenidos a partir de este análisis.

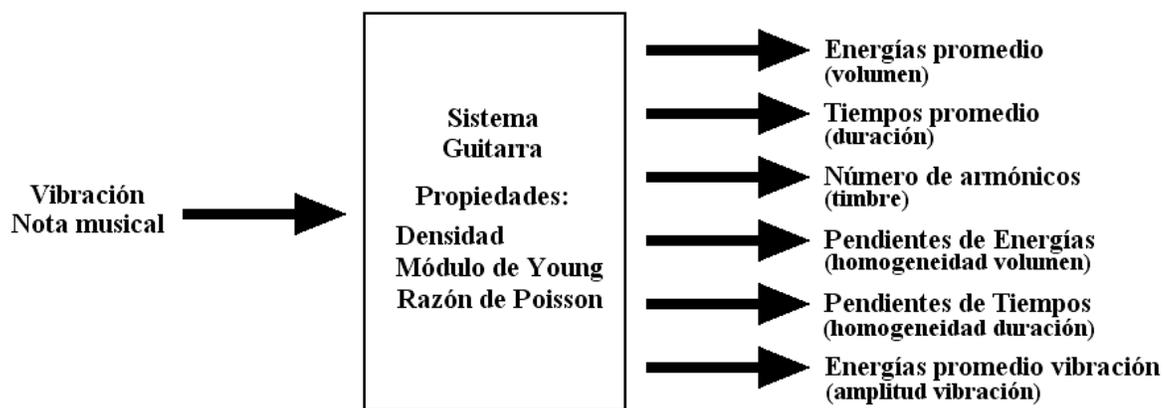


Figura.4.16. Esquema general de la visualización del sistema con sus entradas y salidas.

A continuación se muestran en la Tabla.4.2. las propiedades físicas de las maderas cedro canadiense y pino abeto, y en la Tabla.4.3. los vectores utilizados en el análisis de correlación.

Tabla.4.2. Propiedades físicas de las maderas cedro canadiense y pino abeto alemán.

Madera	Densidad kg/m <sup>3</sup>	Módulo de Young N/mm <sup>2</sup>	Razón de Poisson $\mu$
<b>Cedro canadiense</b>	340	7664.817843	0.396
<b>Pino abeto alemán</b>	370	9708.76927	0.490

En las tablas siguientes se muestran los vectores utilizados en el análisis. En la Tabla.4.3. se muestran vectores de las propiedades físicas del sistema utilizados para los dos grupos de guitarras, las dos primeras entradas corresponden a las propiedades del cedro y la tercera a las del pino. De otra manera, en la Tabla.4.4. se muestran vectores de las salidas físicas utilizados para los dos grupos de guitarras. En la primera entrada de los vectores del primer grupo se encuentran los datos correspondientes a la guitarra Cedro1, en la segunda entrada los de la guitarra Cedro2, y en la tercera los de la guitarra Pino; por su parte, en la primera entrada de los vectores del segundo grupo se encuentran los datos correspondientes a la guitarra Alvaro, en la segunda entrada los de la guitarra Yamaha, y en la tercera los de la guitarra Alhambra.

Tabla.4.3. Vectores de entrada al sistema (propiedades físicas de las maderas).

<b>Propiedad</b>	<b>Vector</b>
Densidad	[340 340 370]
Módulo Young	[7664.817843 7664.817843 9708.769270]
Razón Poisson	[0.296 0.296 0.490]

Tabla.4.4. Vectores de salida (respuesta del sistema).

<b>Salida</b>	<b>Vector</b>	
	<b>Grupo 1</b>	<b>Grupo 2</b>
Energías promedio	[0.0406 0.0375 0.0561]	[0.0025 0.0040 0.0044]
Tiempos promedio	[1.3526 1.4590 1.5123]	[1.4372 1.4521 1.5429]
Número de armónicos	[55 57 55]	[41 38 43]
Pendientes de Energías	[0.000043758 0.000018615 0.000098843]	[0.000002490 0.000013309 0.000001411]
Pendientes de Tiempos	[-0.004384657 -0.004200695 -0.004864509]	[-0.004160823 -0.004136121 -0.004950233]
Energías promedio vibración	[0.0071 0.0146 0.0198]	[0.0080 0.0075 0.0108]

En seguida se muestra en la Tabla.4.5. los coeficientes de correlación calculados a partir de los vectores de entrada y salida para las guitarras del primer y segundo grupo.

Tabla.4.5. Coeficientes de correlación para las guitarras del primer y segundo grupo.

<b>Entrada \ Salida</b>	<b>Grupo1</b>			<b>Grupo2</b>		
	<b>Densidad</b>	<b>Módulo de Young</b>	<b>Razón de Poisson</b>	<b>Densidad</b>	<b>Módulo de Young</b>	<b>Razón de Poisson</b>
Energías promedio	<b>0.9878</b>	<b>0.9878</b>	<b>0.9878</b>	<b>0.6628</b>	<b>0.6628</b>	<b>0.6628</b>
Tiempos promedio	<b>0.7562</b>	<b>0.7562</b>	<b>0.7562</b>	<b>0.9915</b>	<b>0.9915</b>	<b>0.9915</b>
Número de armónicos	-0.5000	-0.5000	-0.5000	0.8030	0.8030	0.8030
Pendientes de Energías	0.9519	0.9519	0.9519	-0.5693	-0.5693	-0.5693
Pendientes de Tiempos	<b>-0.9633</b>	<b>-0.9633</b>	<b>-0.9633</b>	<b>-0.9996</b>	<b>-0.9996</b>	<b>-0.9996</b>
Energías promedio vibración	<b>0.8093</b>	<b>0.8093</b>	<b>0.8093</b>	<b>0.9901</b>	<b>0.9901</b>	<b>0.9901</b>

#### 4.6. Discusión

De la Tabla.4.5. se observa que existe un alto grado de correlación entre las energías promedio (relacionadas con el volumen del sonido), y los tiempos promedio (relacionados con la duración) de las señales de sonido, y las energías promedio de las señales de vibración (relacionadas con la amplitud de vibración), y las pendientes de Tiempos (relacionadas con homogeneidad en la duración del sonido) con la densidad, módulo de Young y razón de Poisson de los materiales utilizados en la tapa de la guitarra. De otra manera, no se puede concluir que exista una correlación entre el número de armónicos (timbre), y la homogeneidad en el sonido en volumen con las propiedades de los materiales anteriormente citadas. En general, se puede pensar en atribuir esta falta de correlación a la manera como ha sido construido el instrumento.

Es importante resaltar el hecho que en el capítulo anterior se observó que las guitarras con madera de pino tienen mayor intensidad de sonido que las de cedro, y que las de cedro tienen mayor homogeneidad que las de pino. Ahora con el análisis de correlación se observa que el volumen y la homogeneidad del sonido en cuanto a la duración están relacionados con las propiedades de la madera. Así, se puede afirmar que a mayor densidad, módulo de Young ó razón de Poisson se tendrá mayor volumen y menor homogeneidad en la duración del sonido.

En este capítulo se analizó correlación entre el sonido y la vibración; en general se observó que existe un alto grado de correlación entre las propiedades físicas de la madera y el volumen, duración, y homogeneidad en la duración del sonido así como en la amplitud de vibración. En el siguiente capítulo se analizará por el método de elementos finitos cómo se afecta la vibración de la tapa armónica ante distintas propiedades del material que la compone.

## CAPÍTULO 5: SIMULACIÓN

En este capítulo se presentará en primera instancia el estudio de vibraciones por el método de elementos finitos, y como segundo aspecto el análisis realizado a las vibraciones de la tapa armónica utilizando diferentes materiales.

### 5.1. Estudio de vibraciones en elementos finitos

El método de elementos finitos es un método numérico por el cual se puede determinar el comportamiento de una estructura ante las cargas sustituyendo la solución continua, exacta y en la mayoría de los casos imposible del sistema de ecuaciones diferenciales que conforman el problema elástico por una solución discontinua o discreta y, por tanto, aproximada. Para ello se discretiza la estructura, es decir, se divide en elementos no diferenciales, o elementos finitos, interconectados entre sí a través de un determinado número de puntos, llamados nodos.

Después de estudiar cada elemento por separado se recompone la estructura restableciendo el equilibrio y la compatibilidad de desplazamientos en los nodos, lo que da lugar a un sistema de ecuaciones algebraicas. La resolución de este sistema de ecuaciones permite hallar los desplazamientos de los nodos y, a partir de ellos, las restantes incógnitas de la estructura. Este es un método aproximado cuyo grado de aproximación aumenta con el número de elementos en que se divide la estructura y la buena definición de las condiciones de contorno [16].

Las ventajas principales del MEF son que puede ser aplicado a formas arbitrarias en muchas dimensiones, y además las formas analizadas pueden hacerse de muchos materiales. Las propiedades de los materiales pueden ser no homogéneas (dependencia de la ubicación) y/o anisótropas (dependencia de la dirección). La manera en que el objeto es sostenido (también llamados fijaciones o limitaciones) puede ser general, así como las perturbaciones externas (fuerza, presión, temperatura, flujo, etc.). El MEF proporciona un proceso estándar para convertir los principios que gobiernan la energía o ecuaciones diferenciales en un sistema de ecuaciones matriciales para resolverse de manera aproximada. Para problemas lineales tales soluciones pueden ser muy exactas y rápidamente obtenidas. Después de obtener una solución aproximada, el MEF proporciona procedimientos estándares adicionales para continuar con los cálculos (post-proceso).

En el modelo de elementos finitos, la naturaleza continua de la rigidez y de la masa conduce al uso de matrices cuadradas para rigidez, masa y amortiguamiento. Ellas pueden contener casos especiales de elementos lineales de resortes y amortiguadores, así como masas puntuales. Los amortiguadores disipan energía, pero los resortes y las masas no.

Si se tiene un sistema de elementos finitos con muchos grados de libertad entonces se puede generalizar un sistema de un grado de libertad con un vector de desplazamientos,  $X(t)$ , interactuando con una matriz cuadrada de masa  $M$ , una matriz de rigidez  $K$ , una

matriz de amortiguamiento  $C$ , y un vector de fuerzas externas aplicadas  $F(t)$ , conservando la misma forma general, así:

$$M \frac{d^2 X}{dt^2} + C \frac{dX}{dt} + KX(t) = F(t) \quad (5.1)$$

más las condiciones iniciales sobre los desplazamientos  $X(0)$ , y velocidad  $v(0) = dX/dt(0)$ . Integrando estas ecuaciones en el tiempo se tiene una solución que depende del tiempo. Los conceptos de solución son básicamente los mismos, ellos sólo tienen que hacerse usando álgebra de matrices. El correspondiente movimiento armónico simple, o modo libre de vibración ( $C = 0, F = 0$ ) para un sistema de elementos finitos es:

$$M \frac{d^2 X}{dt^2} + KX(t) = 0 \quad (5.2)$$

Nuevamente se destaca la similitud entre la ecuación 4.19 y la ecuación del movimiento armónico simple, y entre estas y la ecuación 5.2. La diferencia radica en que la ecuación 5.2 describe el movimiento armónico simple pero en este caso lo hace de manera matricial, de modo que es aplicable a sistemas con muchos grados de libertad.

En general, para el movimiento armónico simple se asume que  $X(t) = A \sin(\omega t)$  donde  $A$  es la amplitud, y es llamada vector de modo en frecuencia circular  $\omega$ . Esto lleva al problema de valores propios (eigenvalores) de la matriz general:

$$|K - \omega^2 M| = 0 \quad (5.3)$$

Hay una frecuencia  $\omega_k$  y un vector de modo  $A_k$  para cada grado de libertad  $k$ . Encontrar los vectores y valores propios para la matriz general es computacionalmente más costoso que hallar la solución en el tiempo de dicha matriz. Por lo tanto, la mayor parte de los sistemas de elemento finitos normalmente resuelven los sistemas para las primeras frecuencias naturales. Dependiendo de la potencia computacional disponible, eso puede significar de 10 a 100 frecuencias.

## 5.2. Simulación

La simulación se realizó en el software Z88, el cual está diseñado para la solución de estructuras mecánicas, problemas estáticos con la ayuda del Método de Elementos Finitos (MEF), y que está disponible conforme a GNU-GPL como un software libre con código fuente.

Para la simulación se creó una base de datos artificial creada a partir de las propiedades físicas reales del pino abeto alemán, en esta base de datos se consideró el módulo de Young, la densidad y la razón de Poisson. Así, se mantuvo constante dos propiedades

físicas mientras se hizo variaciones en la restante. Esto se realizó con el fin de encontrar una relación entre las propiedades físicas de los materiales y la amplitud de vibración.

Inicialmente se simularon 15 materiales con las propiedades siguientes, los primeros 5 materiales conservan el módulo de Young y la densidad constante, mientras se varía la razón de Poisson  $\mu_{LT}$ ; los materiales 6 a 10 mantienen la razón de Poisson constante al igual que la densidad, mientras se varía su módulo de Young; y los últimos 5 materiales mantienen constante tanto el módulo de Young como la razón de Poisson, mientras se varía su densidad, como se muestra en la Tabla.5.1.

Tabla.5.1. Propiedades de materiales utilizados en la primera fase de la simulación.

<b>Material</b>	<b>Densidad</b>	<b>M. Young</b>	<b>Razón de Poisson <math>\mu_{LT}</math></b>
01	0.00000000037	9708.76927	<b>0.28</b>
02	0.00000000037	9708.76927	<b>0.37</b>
03	0.00000000037	9708.76927	<b>0.46</b>
04	0.00000000037	9708.76927	<b>0.55</b>
05	0.00000000037	9708.76927	<b>0.64</b>
06	0.00000000037	<b>3300.705341</b>	0.49
07	0.00000000037	<b>5945.412759</b>	0.49
08	0.00000000037	<b>8590.120176</b>	0.49
09	0.00000000037	<b>11234.82759</b>	0.49
10	0.00000000037	<b>13879.53501</b>	0.49
11	<b>0.00000000016</b>	9708.76927	0.49
12	<b>0.00000000030</b>	9708.76927	0.49
13	<b>0.00000000044</b>	9708.76927	0.49
14	<b>0.00000000058</b>	9708.76927	0.49
15	<b>0.00000000071</b>	9708.76927	0.49

En la segunda fase se realizó una nueva simulación considerando solamente cambios en la razón de Poisson. Se utilizaron 9 materiales, en los que se mantuvo constante la densidad ( $0.00000000037t/mm^3$ ) y módulo de Young ( $9708.76927 N/mm^2$ ), mientras que se varió la razón de Poisson entre un valor mínimo de 0.13 y un valor máximo de 0.46. En la Tabla.5.2. se muestra la variación en la razón de Poisson en los materiales utilizados en la segunda fase de la simulación.

Tabla.5.2. Propiedades de los materiales utilizados en la segunda fase de la simulación.

Material	Razón de Poisson $\mu_{LT}$
01	0.13
02	0.17
03	0.21
04	0.24
05	0.28
06	0.33
07	0.37
08	0.42
09	0.46

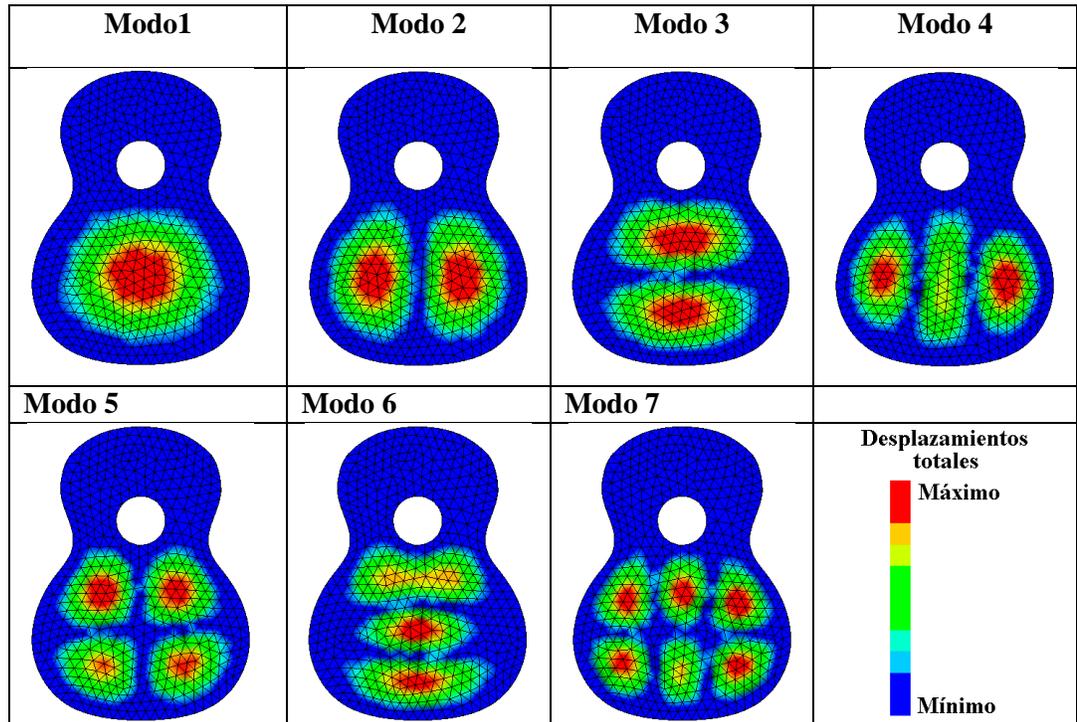
En la Tabla.5.3. se muestran los desplazamientos máximos en  $mm * 10^{-2}$  en los diferentes modos, obtenidos a partir de la simulación considerando cambios en la razón de Poisson.

Tabla.5.3. Desplazamientos máximos en  $mm * 10^{-2}$  en los diferentes modos.

<b>Modo</b> <b>Material</b>	1	2	3	4	5	6	7
01	3.34	3.21	3.19	3.49	3.27	3.42	3.21
02	3.34	3.21	3.19	3.49	3.27	3.43	3.21
03	3.35	3.21	3.19	3.49	3.27	3.43	3.21
04	3.35	3.22	3.19	3.49	3.27	3.43	3.21
05	3.35	3.22	3.20	3.49	3.27	3.43	3.22
06	3.36	3.22	3.23	3.50	3.28	3.44	3.22
07	3.36	3.23	3.21	3.51	3.29	3.44	3.24
08	3.38	3.25	3.22	3.53	3.31	3.45	3.26
09	3.42	3.28	3.26	3.56	3.34	3.46	3.31

En la Tabla.5.4. se muestran los modos de resonancia obtenidos a partir de la simulación considerando cambios en la razón de Poisson.

Tabla.5.4. Modos de resonancia obtenidos a partir de la simulación considerando cambios en la razón de Poisson.



Recuérdese que, en los capítulos 3 y 4 se obtuvo que tanto el volumen en el sonido como la amplitud de vibración aumentan a medida que crece la magnitud de las propiedades físicas. Esto se confirma en la simulación, particularmente para la razón de Poisson, y se puede apreciar en la Tabla.5.3. Así, a medida que se incrementa la razón de Poisson en los diferentes materiales, en general, crece la amplitud de vibración en todos los modos. Entonces, es de esperarse que los resultados de la simulación concuerden con la realidad, de manera que los modos de vibración en la práctica se produzcan de la manera en que los predice el método de elementos finitos. En la Tabla.5.5. se muestran las frecuencias en Hz en los diferentes modos, obtenidas a partir de la simulación considerando cambios en la razón de Poisson.

Tabla.5.5. Frecuencias en Hz en los diferentes modos.

Modo Material	1	2	3	4	5	6	7
01	282.8406	532.2936	648.3148	921.9962	934.8271	1200.551	1426.116
02	284.6711	535.7037	652.3055	927.7479	940.4236	1207.731	1434.411
03	287.1300	540.3024	657.7701	935.5998	948.1533	1217.726	1446.028
04	289.4391	544.6316	662.9654	943.0522	955.5398	1227.333	1457.229
05	293.2408	551.7757	671.6129	955.4428	967.8863	1243.488	1476.102
06	299.4485	563.4775	685.9303	975.9436	988.4304	1270.612	1507.841
07	306.0354	575.9463	701.3642	998.0540	1010.703	1300.347	1542.681
08	317.7572	598.3161	729.4646	1038.473	1051.648	1355.897	1607.946
09	333.7326	629.4117	769.1777	1096.549	1110.217	1437.859	1705.311

En seguida se muestra la gráfica de desplazamiento vs. Módulo de Poisson para cada uno de los modos. En las gráficas se muestra también una curva de ajuste para los datos dada por un polinomio de grado 5.

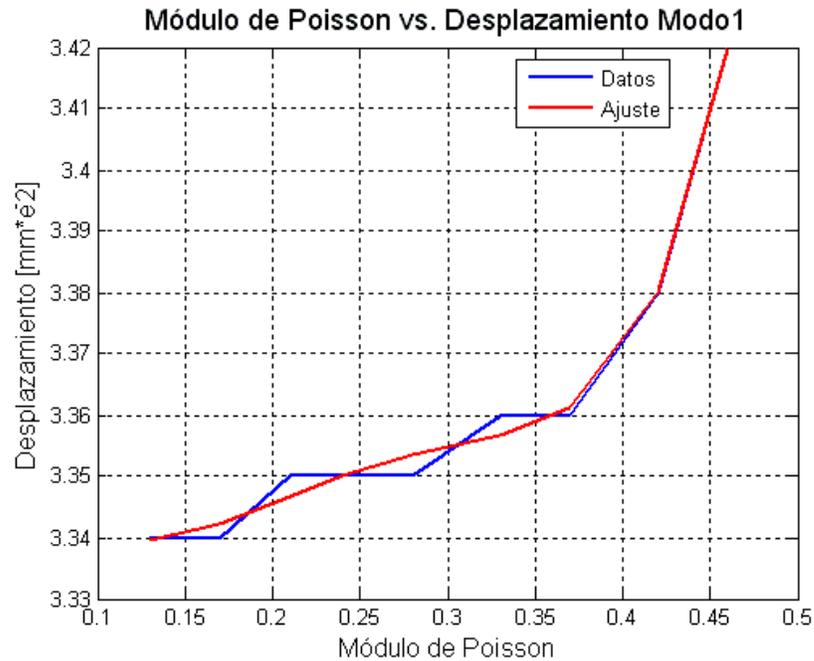


Figura.5.1. Módulo de Poisson vs. Desplazamiento para el modo 1.

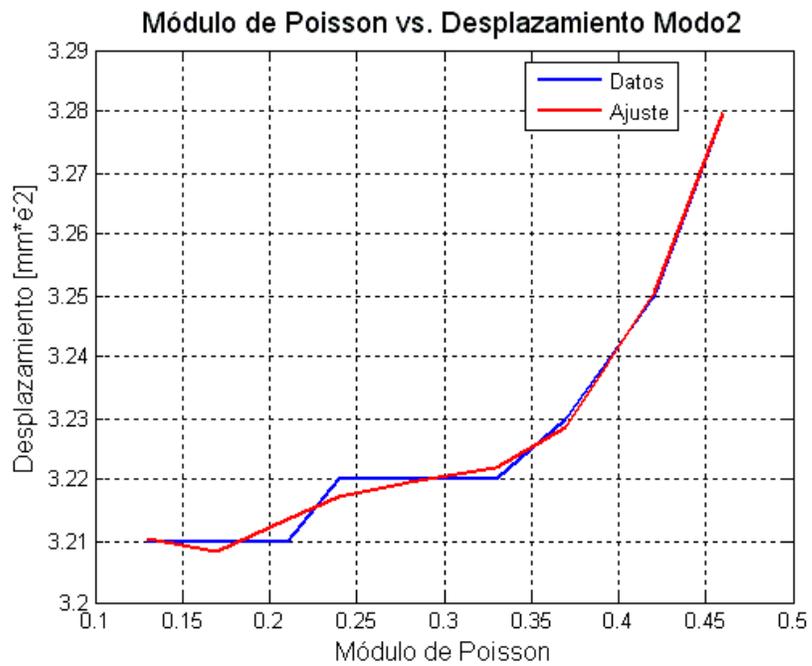


Figura.5.2. Módulo de Poisson vs. Desplazamiento para el modo 2.

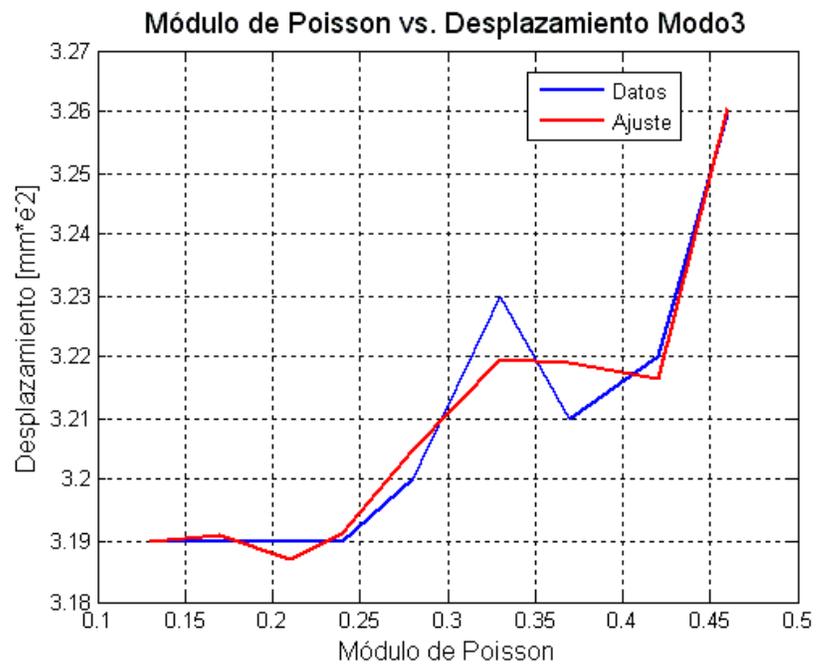


Figura.5.3. Módulo de Poisson vs. Desplazamiento para el modo 3.

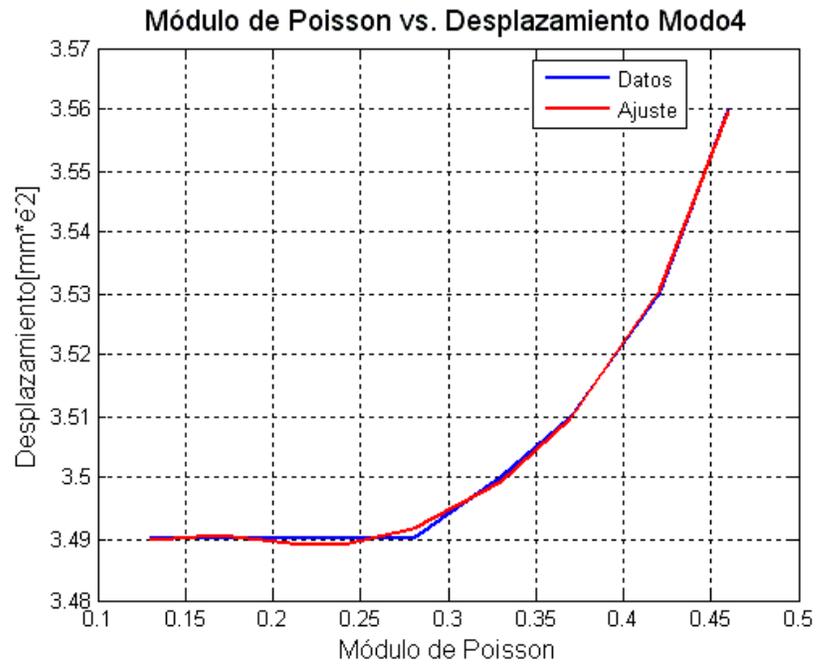


Figura.5.4. Módulo de Poisson vs. Desplazamiento para el modo 4.

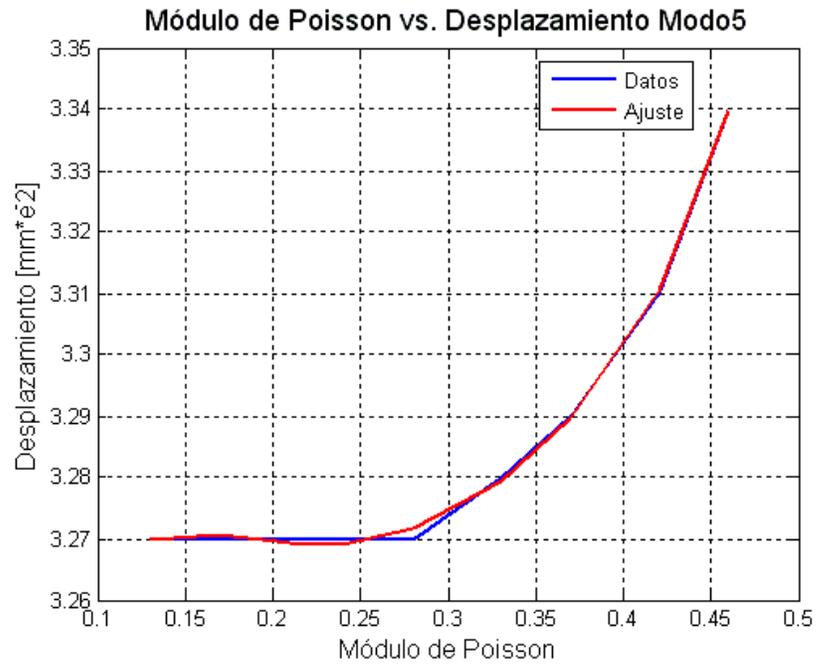


Figura.5.5. Módulo de Poisson vs. Desplazamiento para el modo 5.

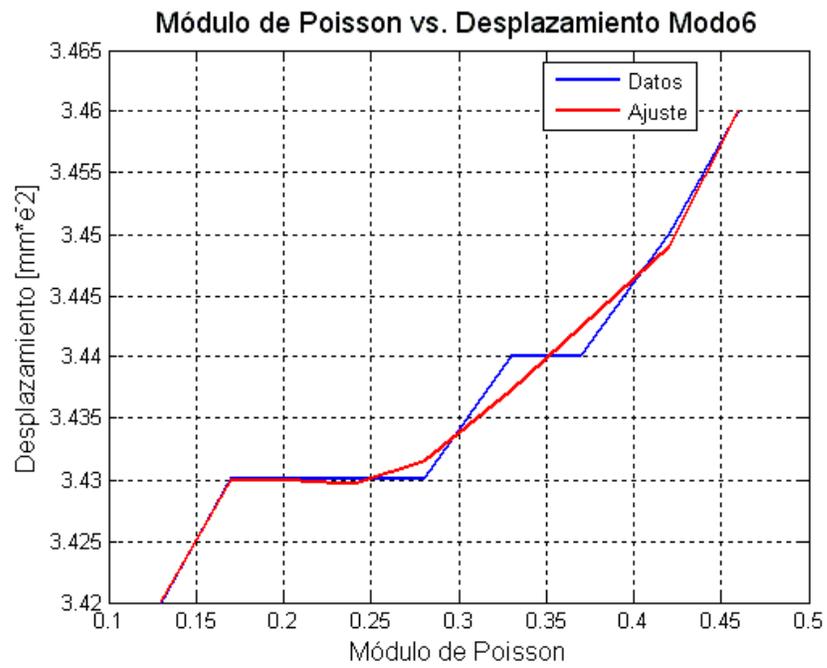


Figura.5.6. Módulo de Poisson vs. Desplazamiento para el modo 6.

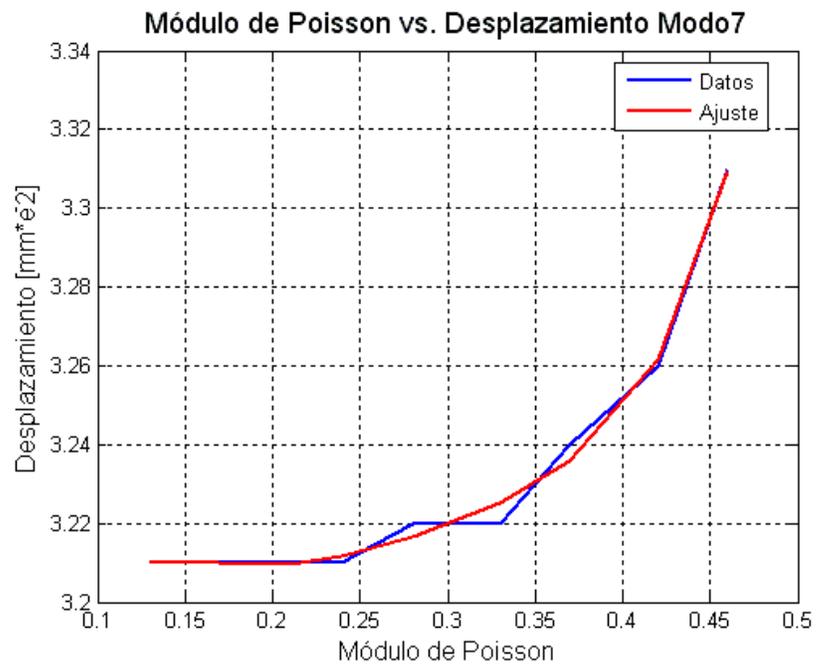


Figura.5.7. Módulo de Poisson vs. Desplazamiento para el modo 7.

De las gráficas anteriores se observa que, en general, la amplitud en la vibración aumenta con el incremento en la razón de Poisson del material. De la primera fase de la simulación se observó que la amplitud aumenta a medida que aumenta la razón de Poisson; pero no se notan cambios cuando se mantiene constante la razón de Poisson y se varía la densidad ó el módulo de Young. Esto se puede explicar con el hecho de que el software está diseñado particularmente para encontrar las frecuencias resonantes de los sistemas, sin embargo no es su prioridad el cálculo de los desplazamientos cuando se analizan vibraciones.

### 5.3. Modos obtenidos experimentalmente con acelerómetros

Experimentalmente se obtuvieron ciertos patrones o modos en que la tapa vibra ante la excitación de las cuerdas. Se observa una influencia de los modos 2 y 4; pero también se debe aclarar que en el experimento no se tiene las formas exactas de los modos mostrados anteriormente debido a que la frecuencia de excitación es diferente a la frecuencia resonante de cada modo. En las figuras siguientes se muestran patrones de vibración para las guitarras Cedro1, Pino y Cedro2.

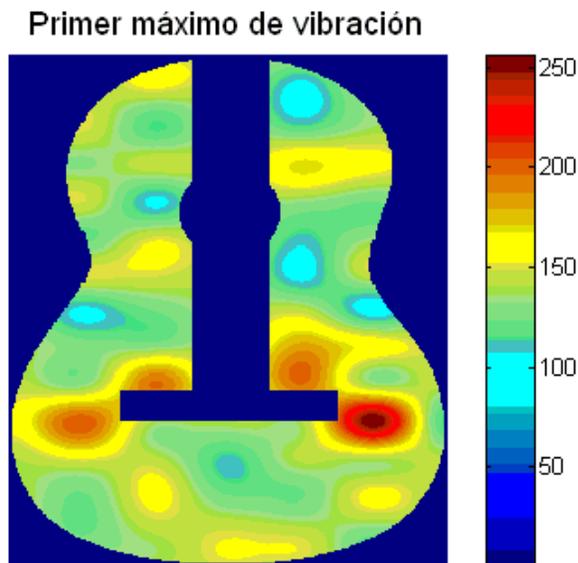


Figura.5.8. Excitación de la tapa de la guitarra Cedro1 para la nota E3.

Primer máximo de vibración

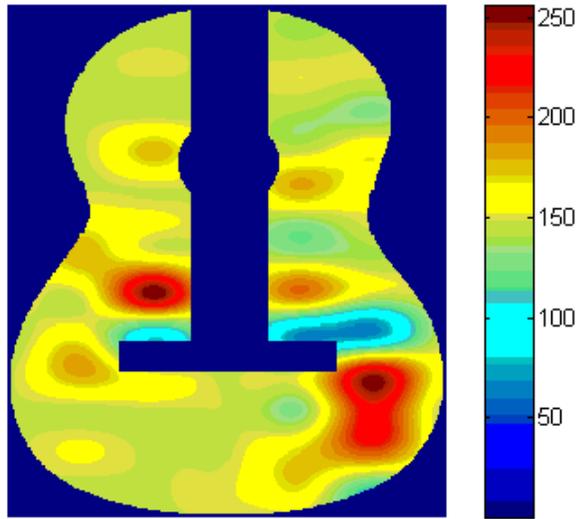


Figura.5.9. Excitación de la tapa de la guitarra Pino para la nota E4.

Primer máximo de vibración

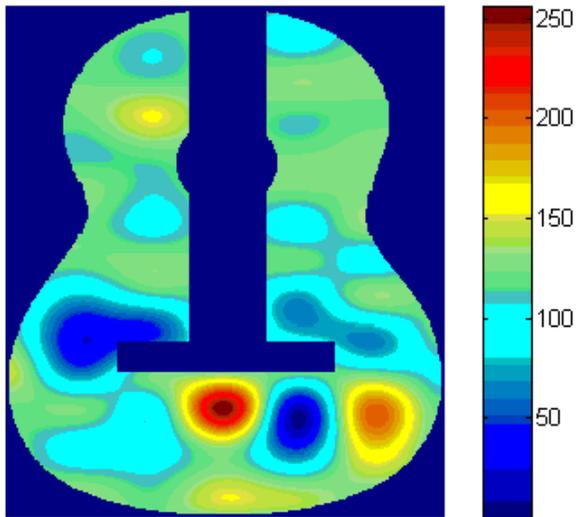


Figura.5.10. Excitación de la tapa de la guitarra Cedro2 para la nota E3.

#### **5.4. Discusión**

En el análisis realizado en este capítulo se resalta el hecho de que la amplitud de vibración aumenta a medida que crece la razón de Poisson en el material de la tapa. Así se comprueba los resultados obtenidos en los capítulos 3 y 4 para la razón de Poisson, en donde se observó el incremento tanto en la amplitud de sonido como de vibración con el crecimiento de las magnitudes de las propiedades del material. De otra manera, la simulación no es concluyente frente a la densidad y el módulo de Young y la relación con la amplitud de vibración.

Por otro lado, se debe tener en cuenta que en el experimento existieron factores que conllevan a errores en la medición: se utilizó cinta adhesiva para sostener los acelerómetros en la tapa, preservando de esta manera las guitarras y el transductor, pero afectando directamente a la medición; se debe tener en cuenta también que los acelerómetros influyen de manera directa la vibración misma de la tapa armónica; además los factores ambientales producen variaciones en el sonido y vibración en la guitarra. Con el fin de tener una mejor medición, inicialmente se intentó utilizar interferometría speckle pero no se contó con las condiciones necesarias para su implementación, así que se eligió el modo mecánico con acelerómetros en su reemplazo.

## CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

### 6.1. Conclusiones

Se analizaron las propiedades físicas tales como densidad, módulo de Young y razón de Poisson para encontrar la relación entre éstas y propiedades del sonido como la duración, el timbre y la duración en guitarras construidas con maderas de cedro canadiense y pino abeto alemán. El análisis se dividió en dos grupos, uno con 3 guitarras construidas por el luthier Jorge Noguera en la ciudad de Cali, y un segundo grupo constituido por una guitarra Alvaro, una Yamaha y una guitarra Alhambra. En los dos grupos se contó con dos guitarras de tapa de cedro y una con tapa de pino. Se utilizó la energía promedio como indicador del volumen del sonido, el tiempo en el que se consume el 95% como el de la duración, el número de armónicos como referente en el timbre, y la pendiente de las rectas de regresión de las energías y tiempos de duración como indicadores de la homogeneidad en el volumen y duración.

Se encontró que las guitarras de pino presentan mayor volumen y duración del sonido, mientras que en el primer grupo las de cedro tienen mayor homogeneidad. El segundo grupo de guitarras no fue concluyente para la homogeneidad del sonido, sin embargo se nota que las guitarras Alhambra y Alvaro tienen homogeneidad en sus registros muy similares. Con respecto al timbre se nota un contenido frecuencial similar en todas las guitarras del primer grupo, lo que se relaciona con la fuente de construcción de las guitarras que componen al grupo (Luthier Jorge Noguera).

Para establecer la relación entre a densidad, el módulo de Young, la razón de Poisson y el sonido se utilizó como medida el coeficiente de correlación y se encontró que el volumen y la duración del sonido, y la amplitud de vibración están correlacionados con la densidad, el módulo de Young y la razón de Poisson; así a mayor densidad se tiene mayor volumen y duración en el sonido, y mayor amplitud de vibración. Lo mismo se observa con el módulo de Young y la razón de Poisson. De la misma manera que en el análisis acústico, el pino presenta mayor volumen y duración de sonido que el cedro, destacando de esta manera el hecho que las magnitudes de las propiedades del pino son mayores que las del cedro.

La simulación por el método de elementos finitos verificó para la razón de Poisson el hecho de que entre mayor sea la magnitud de esta, mayor serán las amplitudes de vibración en los materiales utilizados. Para visualizar los modos de vibración se captaron las vibraciones y se graficaron en unidades arbitrarias de desplazamiento debido a que no se contaba con un instrumento que permitiera patronar las vibraciones, y con ciertas limitaciones se mostraron las vibraciones presentes en la tapa armónica.

Con el desarrollo de este trabajo de investigación se crea vínculos entre la Ingeniería Física y la Música por medio de la acústica como un componente común a éstas áreas. De otra parte, desde el punto de vista artístico se acerca al público hacia la guitarra, buscando una mejor calidad sonora de manera que satisfagan tanto al músico como al espectador.

Finalmente se visualiza una explicación experimental y teórica al por qué muchos músicos y luthiers prefieren las guitarras con tapa armónica de pino. Lo que ratifica a este material como uno de los más indicados para la construcción de esta importante pieza en la guitarra, invitando de esta manera a retomar la vieja tradición de experimentar con diferentes materiales en la búsqueda de un mejor sonido para el instrumento; con la diferencia de que ahora se tiene una referencia de las características que deben tener los nuevos materiales a utilizar.

## **6.2. Trabajos futuros**

Como base para un trabajo futuro se recomienda optimizar la técnica de medición de la vibración, preferiblemente eligiendo un método óptico ya que así se interferirá en menor medida sobre el sistema. Además se debe encontrar una técnica que permita determinar la calidad del timbre de una forma cuantitativa.

Experimentalmente se debe tomar más muestras de sonido y vibración a mayor número de instrumentos, esto con el fin de realizar un análisis estadístico representativo.

Por otro lado, se recomienda explorar otros programas en la simulación; algunos de ellos podrían ser Ansys, Comsol o Abaqus.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] SEGURET, C. “*El mundo de las guitarras*”, Paris, Iberlibro, 1997.
- [2] BÉCACHE, E. CHAIGNE, A. DERVEAUX, G. JOLY, P. “*Numerical simulation of a guitar*”, 2004.
- [3] ELEJABARRIETA, M. J. SANTAMARÍA, C; EZCURRA, A. “*Estudio de la tapa armónica de la guitarra por el método de elementos finitos*”, Universidad del País Vasco, Universidad pública de Navarra, España.
- [4] VÁZQUEZ, M, LÓPEZ, E. “*El método de los elementos finitos aplicado al análisis estructural*”, Editorial Noela, Madrid, España, 2001.
- [5] TORRES, T. J. A. “*Análisis modal de la tapa armónica de una guitarra clásica mediante la aplicación de Ansys*”, Instituto Tecnológico de Querétaro, México.
- [6] VILLAR, J. “*La guitarra española*”, Ed. Olivis.
- [7] ASKELAND, R. D. “*Ciencia e ingeniería de los materiales*”, Universidad de Missouri-Rolla, 3 Ed., International Thomson Editores, 1998.
- [8] CARRIÓN, A. “*Diseño acústico de espacios arquitectónicos*”, 1ª Ed, Catalunya, UPC, 1998.
- [9] RUIZ, B. R. “*Algunas notas sobre la acústica de la guitarra clásica*”, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F., 1996
- [10] JANSSON, E. “*Acoustics for Violin and guitar Makers*”, 4ª Ed, 2002.
- [11] TIPLER, M. “*Física para la ciencia y la tecnología*”
- [12] ELALI, T. “*Discrete Systems and Digital Signal Processing with MATLAB*”, University of California, CRC Press, 2004
- [13] ROSSING, T. D. FLETCHER, N. H. “*Physics of musical instruments*”.
- [14] PERNIA, M. D. “*Introducción a la medición de vibración*”, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, 2004.
- [15] BLANCHET, G. CHARBIT, M. “*Digital Signal and Image Processing using MATLAB*”, 1ª Ed, Hermès Science Publications, 2001.
- [16] VÁSQUEZ, M. LÓPEZ, E. “*El método de elementos finitos aplicado al análisis estructural*”, Noela Editorial, Madrid, 2001.
- [17] ROSSING, T. D. FLETCHER, N. H. “*The science of strings instruments*”, New York, 2010.