

Resonancias simpáticas

Entre la física y la guitarra española

Daniel Baccino - Guzmán Trinidad

Resonancias simpáticas Entre la física y la guitarra española

“Abordaje experimental en torno a la acústica musical utilizando las nuevas tecnologías con el objetivo de construir un prototipo de guitarra (método español o Torres) cuya performance se analizará posteriormente: un proyecto de inspiración STEAM.”

**Daniel Baccino - Guzmán Trinidad
Profesores de física**

Proyecto realizado durante el 2022 en el marco del Estatuto del Funcionario Docente en su art. 75 (“año sabático”) y aprobado por la DGES en 2023 de acuerdo al fallo del tribunal actuante.

Los autores, la física y la guitarra



Daniel Baccino (San Ramón, Canelones, 1967) Mis primeros procesos de socialización se concretaron integrando aportes de las aulas de una escuela rural y del almacén de ramos generales en el que crecí. Al final de mi adolescencia emigré a Montevideo para completar mi formación de grado como profesor de física (IPA, 1989).

En el ámbito laboral, la docencia deja trazas indelebles en mi vida, desarrollada a partir de esa formación inicial. En la actualidad soy profesor efectivo de física en la DGES y el CFE (ANEP, Uruguay) y ayudante preparador de física efectivo en la DGES. He desarrollado en el CFE actividades de docencia, investigación y extensión, asociadas a un cargo de profesor efectivo de física básica radicado en el IPA (2019), que pueden consultarse en [CVuy](#). La creación de una *Universidad Nacional de la Educación*, en la que la formación universitaria de educadores de

Uruguay sea una realidad, es un objetivo que aspiro podamos alcanzar a mediano plazo.

Mi vínculo con la guitarra ha sido tardío, desafortunadamente. A pesar de ello, sostengo el objetivo de ejecutar de forma fluida y digna el instrumento. Mantengo (con alguna interrupción) la asistencia a clases de guitarra popular, en las que mi maestro *Fredy Pérez* renueva en cada encuentro la esperanza de alcanzar el objetivo, con optimismo, perseverancia, y respetando los tiempos de su alumno.



Guzmán Trinidad (Montevideo, 1968) es *profesor de física* egresado del Instituto de Profesores “Artigas” (IPA) en 1992 y *ayudante preparador de laboratorio de física* egresado del IPA en 1999. Fue profesor del IPA en ambas carreras: en la primera desde 2008 a 2017 y en la segunda en 1996 y 2007. Se ha desempeñado como *profesor* y *ayudante preparador de física* en instituciones de enseñanza media públicas y privadas desde 1989. Ha trabajado fundamentalmente en el Liceo Solymar N° 1 (Ciudad de la Costa, Canelones) y en el

Colegio “Jesús María” (Carrasco, Montevideo).

En 1990 participó como fundador del grupo que creó el actual Programa “Áreas Pedagógicas” (convenio CES-INAU) que permitió a menores reclusos en la Colonia “Dr. Berro” continuar sus estudios secundarios. Desde 1989 a 1992 actuó como colaborador honorario del Área de Oceanografía física del Instituto Nacional de Pesca (INAPE, MGAP); en el marco de dicha tarea se embarcó durante 12 días en el buque de investigación *Aldebarán* para realizar en equipo la caracterización físico-química de una zona del Atlántico Sudoccidental.

Ha participado como tallerista, ponente y/o conferencista en diversos eventos (Encuentros Nacionales de Profesores de Física organizados por la APFU, entre otros), así como publicado numerosos artículos sobre física, enseñanza de la física y/o uso educativo de las netbooks XO (OLPC) en revistas especializadas tanto a nivel nacional como internacional. Es autor del libro “Física con XO” que resume su investigación acerca de cómo programar y convertir las XO en instrumentos de medidas en laboratorios de física y como fuente de juegos y proyectos de electrónica y programación. Esta obra fue traducida al inglés para facilitar su aplicación por parte de la comunidad OLPC en el mundo. El acceso al libro es libre desde el *Portal Uruguay Educa* <https://uruguayeduca.anep.edu.uy/recurso-s-educativos/1673> y también integra la *Biblioteca País de Plan Ceibal* <https://bibliotecapais.ceibal.edu.uy/info/fisica-con-xo-00003681>. En 2018 el CODICEN publica en papel la obra para distribuirla por centros educativos de todo el país y en las embajadas de Uruguay en el mundo (Serie *Edición Homenaje*, UTU-CETP/MRREE en el marco del

Proyecto Editorial del CETP coordinado por el profesor Alfredo Coirolo).

En 2012 fue designado, junto al profesor Eduardo Fiore, como *Enlace CES-Ceibal* para coordinar y potenciar acciones entre ambos organismos, tarea que desempeñó hasta el 2014.

Ha incorporado a sus cursos de física el uso de la plataforma de prototipado de electrónica, programación y física ARDUINO, así como creado diversos proyectos destacados con sus estudiantes: *Smartphones a pedal*, *Uruguay visita el CERN¹*, *Taller de fotomicrografías* (en coordinación con colegas de otras asignaturas), por ejemplo.

Durante su infancia y adolescencia realizó estudios de guitarra y canto coral. Fueron sus profesores de guitarra (entre otros) Edgardo Muscarelli y Rubén Olivera. Su pasión por la acústica musical y el sonido de la guitarra española lo llevó a formarse en el oficio de luthier realizando el *Curso de Luthería práctica* en el Taller Casciani y luego a estudiar y construir guitarras según el Método Español (o Torres) junto al destacado luthier Ariel Ameijenda.

¹ Evento en el cual estudiantes de Latinoamérica y el Caribe participaron de una masterclass del CERN y analizaron datos de colisiones: <https://quarknet.org/content/atlas-z-path-measurement-2018>.

a doña *María Josefa*, y a don *Francisco Hector* (in memoriam), por la vida.

a *María Lourdes*, por compartirla.

Daniel Baccino

a mis padres Hugo R. y Aminda *Charito*,

a Andrea

y a nuestros hijos Juan Manuel y
Guillermo

Guzmán Trinidad

Índice

Los autores, la física y la guitarra	5
Índice	9
Prólogo	13
Introducción	15
1 Fundamentos seleccionados	25
Introducción	26
Oscilaciones	27
Oscilaciones libres y libres amortiguadas	27
¿Qué sistema físico describe un MAS?	29
Oscilaciones forzadas y resonancia	31
Resonancia de Helmholtz	32
Vibraciones mecánicas en medios extensos	34
Vibraciones transversales en una cuerda tensa	34
Modos normales de una cuerda fija en ambos extremos	36
Aspectos complementarios a considerar para cuerdas reales	38
Columnas de aire en tubos	38
Tubo “cerrado-abierto”	39
Tubo “abierto-abierto”	40
Aspectos complementarios a considerar para columnas de aire reales	40
Vibraciones transversales de una barra	40
Barra prensada en un extremo	41
Barra libre en ambos extremos	42
El diapasón: un artefacto para afinar instrumentos.	43
Modos de una placa	45
Apunte sobre modos normales en placa	45
Vibraciones de placas delgadas	45
Placas con bordes libres	47
Aspectos complementarios a considerar para placas reales	48
Modos de oscilación de una tapa de guitarra	49
La Guitarra clásica moderna: descripción	51
Atributos característicos de los sonidos “musicales”	56
Representación temporal y frecuencial de un sonido	57
Oscilograma	57
Espectrogramas	58
Formatos de los espectrogramas	58
Altura de sonidos “musicales”	61
Una aproximación a la noción de timbre de un sonido	62
Espectro de frecuencias	63
Envolventes	63

Modelado de la envolvente de un sonido	63
Características particulares de la envolvente del sonido de una guitarra según la dirección de pulsación (o punteo) de la cuerda.	64
Formantes	67
Guitarra: Modelos a baja frecuencia	71
Modelo de dos osciladores	72
Modelo de tres osciladores acoplados	74
Anexo: Respuesta en frecuencia a una excitación	77
2 La Guitarra Clásica Moderna: la Española, la de Torres.	79
Un poco de historia	80
Un nuevo estándar: nace la Guitarra Española o Torres	82
El "sonido Torres"	82
Discípulos	83
Torres después de Torres: la Guitarra Española para el mundo	84
Las ideas de Torres en Uruguay	84
Brevísima enumeración de los orígenes de los luthiers, guitarreros y fabricantes de guitarras en nuestro país	85
Anexos	89
Semblanza de Paris Banchetti y sus hermanos Arnaldo y Germano	89
Semblanza de Sonia Di Doménico	90
El Método Español o Torres	91
a - Tapa armónica	91
b - Brazo	91
c - Encolado de tapa y brazo	91
d - Aros y culata	91
e- Encolado del conjunto tapa y brazo a los aros y culata	92
f- Fondo	92
g- Encolado del fondo al resto del instrumento	92
h- Colocación de terminaciones (cenefas, selleta, etc.), acabado y ajustes finales	92
La Guitarra FE14 "la guitarra de papier mâché" (papel maché) o "de cartón" de Antonio de Torres Jurado (1862)	94
3 Guía para la construcción de dos prototipos de guitarra española	97
La SFE14: Guitarra inspirada en la FE14 (1862) "la guitarra de papier mâché" (papel maché) o "de cartón" de Antonio de Torres Jurado	99
a- Tapa armónica	99
b- Brazo	100
c- Encolado de tapa y brazo	102
d- Aros y culata	102
e- Encolado del conjunto tapa y brazo a los aros y culata	104
f- Fondo	106
g- Encolado del fondo al resto del instrumento	108
h- Colocación de terminaciones, acabado y ajustes finales	108
Dimensiones de la guitarra SFE14	115
La GSFE14: Guitarra gemela de la SFE14	117

a- Tapa armónica	117
b- Brazo	118
c- Encolado de tapa y brazo	120
d- Aros y culata	120
e- Encolado del conjunto tapa y brazo a los aros y culata	121
f- Fondo	122
g- Encolado del fondo al resto del instrumento	122
h- Colocación de terminaciones (cenefas, selleta, etc.), acabado y ajustes finales	122
Dimensiones de la guitarra GSFE14	126
Evaluando las guitarras SFE14 y GSFE14	127
Reseñas biográficas de los evaluadores	127
Ramiro Agriel	127
Juan Frache	129
Rubén Olivera	130
Fredy Pérez	131
Daniel "Pollo" Píriz	132
Reseñas comparativas de ambas guitarras	134
4 Guía de Actividades Experimentales	137
Acceso a software y aplicaciones para generar, editar, y analizar sonidos	138
Advanced Spectrum Analyzer	138
Audacity	138
Online Tone Generator	138
Phyphox	138
Physics Toolbox Sensor Suite	139
Sonic Visualiser	139
Tune!It Lite	139
Visual Analyser	140
01 - Oscilaciones de columnas de aire en tubo abierto-abierto: frecuencia en función del largo del tubo	142
02 - Oscilación de la barra libre-libre: frecuencia en función de la longitud (modo 1)	145
03 - Detección y registro de las oscilaciones de un diapasón	149
04 - Sonido del diapasón libre suspendido por elásticos (plano armónico)	152
05 - Frecuencia del diapasón en función de la temperatura	155
06 - Decaimiento: nivel de sonido del conjunto diapasón-caja en función del tiempo. Cálculo de gamma y Q	157
07 - Microafinación: ajustando la frecuencia del diapasón con o'rings	158
08 - Percusión de una caja de resonancia de profundidad variable	160
09 - Sonoridad de la frecuencia del tono puro de un diapasón	163
Anexo. Montaje del diapasón a la caja	167
10 - Resonancia: Nivel de sonido en función de la frecuencia de excitación en diapasón con caja	168
11 - Oscilaciones de columnas de aire en tubo cerrado-abierto: frecuencia en función del largo del tubo	170
12 - "La reja que canta". Metalofón: acoplado metales y columnas de aire	172

Un panorama por los sonidos emitidos por el instrumento	173
Una frecuencia se destaca entre todas las posibles	174
Variando el percutor	175
13 - Caracterización de propiedades físicas de las maderas y otros materiales	179
Maderas utilizadas en tapa armónica y refuerzos.	179
Maderas utilizadas en mástil, zoque, diapasón y refuerzos.	180
Maderas en láminas o contrachapado y otros materiales utilizados en aros, fondo y adornos	182
14 - Un primer abordaje al estudio de la absorción de sonidos en láminas vibrantes	183
15 - Orejeando guitarras	185
16 - En boca cerrada ... ¿suenan guitarras?	188
Caja de guitarra libre	188
Aros y fondo inmovilizados	189
Helmholtz escondido tras el escenario	190
Una boca de tamaño variable	191
17 - Tornavoz en la boca de una guitarra	193
Tornavoz inserto en la boca de una guitarra con su caja libre	194
Tornavoz inserto en una guitarra con su caja inmovilizada	195
Tornavoz de alto ajustable en una caja inmovilizada	195
18 - Tapa armónica con sticker	198
19 - Con la mochila cargada	200
20 - Danza con lobos: sobreacoplamiento entre las cuerdas y el instrumento	202
21 - Resonancias simpáticas	208
Las resonancias simpáticas en la construcción de instrumentos musicales	210
22 - Matando sobretonos	212
5 Epílogo	215
Algunos índices (¿migas de pan?) a tener en cuenta al concebir una guitarra	216
Referencias	223

Prólogo

Me es muy grato prologar este trabajo de los profesores Daniel Baccino y Guzmán Trinidad, “Resonancias simpáticas. Entre la física y la guitarra española”. Si bien la mayor parte de la obra se desarrolla en torno a la guitarra acústica española (su historia, su teoría acústica y su construcción), puedo afirmar que va mucho más allá en el apasionante tema de la acústica musical.

El primer capítulo introduce la física de las vibraciones de cuerdas ideales y reales, barras sólidas (con lo que se introduce en el xilófono o vibráfono), membranas y placas delgadas (que aplica luego al cuerpo de la guitarra) y tubos de aire (aplicados a los resonadores del vibráfono). Lo notable de estos desarrollos es que no se quedan en las conclusiones teóricas (conocidas en la bibliografía), sino que se presenta un cúmulo de experimentos hechos por los autores, en los cuales se contrastan las previsiones de las teorías involucradas. Todos los experimentos están con documentación gráfica y fotográfica. En el mismo capítulo se abordan las definiciones y características del sonido y del sonido musical, desde lo más elemental. Se introducen temas de análisis de audio incluyendo un vasto conjunto de programas (software) de acceso gratuito para estas actividades. Capítulo altamente aprovechable para quien tenga una formación básica en física.

Con independencia del contenido de acústica física del capítulo anterior, el capítulo 2 describe una muy interesante historia de la guitarra española, desde principios del siglo XIX con el músico y luthier español don Antonio de Torres, así como sus posteriores influencias en los luthieres uruguayos. El capítulo desarrolla pormenorizadamente el método Torres para la fabricación de una guitarra.

El capítulo 3 es de extraordinaria utilidad para los luthieres. Describe paso por paso con documentación fotográfica los procesos seguidos por los autores para fabricar dos guitarras (de distintos materiales) con el método Torres, desde la selección de las maderas y sus cortes hasta el estudio acústico del producto terminado. El capítulo finaliza con evaluaciones de los instrumentos fabricados por los autores, llevadas a cabo por cinco eximios guitarristas uruguayos, cuyos elogiosos comentarios se desarrollan en el texto.

El cuarto capítulo vuelve sobre la física involucrada en la acústica musical, pero con una exposición notable de 22 experimentos de diferentes niveles de desarrollo conceptual, pero no instrumental. Los instrumentos más complejos que se utilizan son el celular o cualquier computadora simple. Todos los experimentos fueron llevados a cabo por los autores, y se aporta una detallada enumeración del software gratuito disponible para los análisis de audio.

Finalmente en el capítulo 5, presentado a modo de epílogo, los autores compilan una extensa serie de sugerencias dadas por varios investigadores de la acústica de la guitarra, a efectos de mejorar la calidad de su sonido. Se trata fundamentalmente de la selección y dimensiones de las maderas utilizadas para su fabricación, así como ciertas relaciones entre parámetros acústicos que determinan empíricamente una notoria mejoría del sonido.

En resumen, opino que es una obra magnífica para sumergirse en la acústica musical *aplicada*, agregaría. Ya que libros de acústica musical hay muchos, pero con este nivel de laboratorio experimental de excelentes resultados y de bajo costo, no suelen encontrarse.

Ismael Núñez Pereira

Dr. en Física por la Universidad de la República (Uruguay)

Dr. en Acústica Física por la Universidad de París VII (Francia)

Introducción

Este proyecto de trabajo fue presentado al *Consejo de Educación Secundaria -CES-*, (actual *Dirección General de Educación Secundaria DGES*) en noviembre de 2020. Fuimos autorizados a realizarlo, bajo el amparo del artículo 75 del Estatuto del Funcionario Docente de ANEP en marzo de 2022 de forma que se desarrolló durante ese año lectivo.

Dos propuestas previas han inspirado a esta, y entendemos pertinente mencionarnos aquí, a modo de reconocimiento: el Taller *La física de la música* (Haniotis, S. y Núñez, I., APFU, Tacuarembó, 2003), y el Curso *Instrumentos musicales: Teoría física y construcción* (Núñez, I. Ameijenda, A., DANF/CFE, Maldonado, 2015-2016).

Este trabajo está dirigido fundamentalmente a docentes de cursos de física de Educación media. Entendemos que algunas secciones pueden ser adecuadas al contacto directo con estudiantes de estos cursos. El mismo se inicia con un extracto del *Protocolo de investigación* aprobado, y se estructura en base a las siguientes secciones principales:

1. una síntesis de fundamentos de los contenidos relacionados con la temática: cuerdas vibrantes, columnas de aire vibrantes, varillas vibrantes, placas vibrantes, entre otros.
2. una mirada a la guitarra clásica moderna (la española, la de Torres) que comienza con una breve reseña biográfica de Antonio de Torres, transita por su incidencia en el mundo y en nuestro país, y termina con una caracterización del “método Torres”.
3. una guía tutorial para la construcción de dos prototipos de guitarra española y dos enfoques para su caracterización: uno de ellos basado (fundamentalmente) en el análisis de Fourier para señales complejas y el otro en la síntesis de un conjunto de caracterizaciones subjetivas realizadas por guitarristas y músicos profesionales de nuestro medio.
4. una serie de actividades experimentales, pasibles de realizarse en un laboratorio de física típico de enseñanza media, y sugerencias para los actores (estudiantes y docentes).
5. Un conjunto de índices a considerar al concebir una guitarra en base a las investigaciones de expertos reconocidos.

Antes de finalizar el trabajo que compartimos aquí, pusimos a consideración de nuestros colegas varios aspectos del mismo, en una Conferencia realizada en el marco del *XXXII Encuentro Nacional de Profesores de Física-XVI Encuentro Internacional de Educación en Física organizado por APFU (Teatro Uamá, Carmelo, setiembre de 2022)*. La misma ([que enlazamos aquí](#)) puede considerarse como una introducción a nuestro proyecto de trabajo.

Daniel Baccino
(dbaccisi@gmail.com)

Guzmán Trinidad
(guzman.trinidad@gmail.com)

Agradecimientos

Agradecemos a la Dirección General de Educación Secundaria por habernos autorizado a realizar este proyecto de investigación.

Gran parte de este trabajo hubiese sido muy distinto de no haber contado con la desinteresada colaboración de muchas personas que brindaron su conocimiento, compartieron sus memorias y recuerdos, establecieron puentes y contactos con otras, que nos apoyaron e impulsaron con entusiasmo. Estamos muy agradecidos con ellos y queremos nombrarlos en esta sección (orden alfabético):

Ramiro Agriel
Ariel Ameijenda
Marta Artagaveytia
Marina Banchetti
Manel Barcons
Javier Cabrera
Alfredo Escande
Manuel Echain
Juan Frache
Caracé Gutiérrez
Fiorella Haim
Eduardo Larbanois
Ismael Núñez
Rubén Olivera
Berta Pereira
Andrés Pereira Varela
Fredy Pérez
Hilario Pérez
Pollo Píriz
Rodolfo Rodríguez Seijas y Sra.
Ivonne Spinelli
Álvaro Suárez

Extracto del Proyecto de investigación aprobado

1. Título del Proyecto.

Abordaje experimental en torno a la acústica musical utilizando las nuevas tecnologías con el objetivo de construir un prototipo de guitarra (método español o Torres) cuya performance se analizará posteriormente: un proyecto de inspiración STEAM.

2. Nombre y apellido del autor/es.

BACCINO, Daniel

TRINIDAD, Guzmán

3. Resumen o Abstract.

Planteamos desarrollar y documentar diez actividades experimentales exploratorias² y de análisis (cualitativo y cuantitativo) relativas a oscilaciones, ondas y acústica musical, y generar una guía para la construcción de un prototipo de guitarra española fabricada con una selección de los materiales de la máxima relación calidad/precio que puedan conseguirse en plaza; la caracterización de los instrumentos musicales construidos (en cuanto a su respuesta acústica) se hará utilizando las herramientas tecnológicas de acceso para cualquier estudiante: aplicaciones de adquisición y análisis de datos disponibles para Smartphone, software incluido en los equipos distribuidos por Plan Ceibal, entre otros. De esta forma la propuesta adquiere las características únicas de ubicuidad que lo posicionan en un contexto STEAM.

4. Tema.

Acústica musical aplicada a la construcción de prototipos de instrumentos musicales y su caracterización.

5. Problema.

La importancia de los contenidos vinculados a oscilaciones y ondas trascienden la acústica musical y podemos encontrarlos en fenómenos tan diversos como los comprendidos desde la actividad sísmica y las comunicaciones hasta la física cuántica. Los aprendizajes de dicha temática por parte de los estudiantes pueden alcanzarse a través de nuestros cursos tradicionales o abordarse con las nuevas pedagogías que se vislumbran como mucho más eficaces para lograrlo. Además, se trata de fomentar el pensamiento libre y crítico e inspirar a la creación, la expresión, el desarrollo de capacidades de comunicación y trabajo en equipo.

² Finalmente presentamos más del doble de lo previsto.

Las habilidades que se entienden fundamentales para la formación de ciudadanía en el Siglo XXI necesitan que los procesos de enseñanza aprendizaje muten en forma correspondiente. Los pedagogos fundacionales del Uruguay como el padre de nuestra escuela pública don José Pedro Varela y el casi desconocido (en esta dimensión que fue su pasión inicial) Dr. Pedro Figari ya pregonaban la necesidad de integrar en la formación básica de niños y adolescentes los conocimientos teóricos (o “librescos”) con las habilidades creativas, constructivas, prácticas: la impostergable dialéctica “mano-cerebro”. Pero esa idea se disgregó luego en trayectos educativos estancos que obligaban a elegir entre una u otra opción: estudios “preuniversitarios” o formación en “artes y oficios”.

Transcurridas varias décadas comienzan a darse cambios: en la década del 80’ el matemático y educador Sudafricano Seymour Papert (colaborador de Jean Piaget) introduce la robótica y programación como forma fermental de *enseñar a pensar a través de la creación*, en los años 90’ en varios países industrializados se retoman esfuerzos por fomentar los contenidos de Ciencia, Tecnología y Matemáticas, en 2007 Europa sugiere con el “Informe Rocard” (“Enseñanza de las ciencias ahora: Una nueva pedagogía para el futuro de Europa”) (Rocard report) sumarse a esos esfuerzos integrando además a la ingeniería en la idea de STEM, y, finalmente, se vuelve a la idea primigenia de las artes como marco integrador del universo educativo en el paradigma STEAM (por su sigla en inglés “Science and Technology interpreted through Engineering and Arts based in Mathematics” o bien “La Ciencia y la Tecnología interpretadas a la través de la Ingeniería y las Artes basadas en las Matemáticas”): un marco conceptual que, si bien ya se manejaba en torno a 2008, recién se concreta en planes educativos alrededor de 2011 (Yakman, 2008); debimos esperar más de un siglo para que se retomase la importancia integradora que nos impulsa ahora a corregir ese rumbo inicial.

Nuestro país se asoma tímidamente a estos movimientos en forma muy desagregada.

La guitarra española es el instrumento más destacado en el hemisferio occidental, en la región y en nuestro país en particular existiendo una de ellas prácticamente en cada familia. Podemos considerarla como un laboratorio (por lo general inexplorado) de acústica musical en sí misma lo cual nos ofrece una oportunidad única para que los estudiantes utilizando sus Smartphones, además de disfrutar de su música, aprendan mucha física mediante la concreción de este proyecto. Por ejemplo: nuestra cultura nacional que reconoce a Stradivari y Amati como padres del violín, desconoce prácticamente todo acerca de cómo se construye la guitarra, de la historia de los luthiers (estrictamente hablando *violeros*) uruguayos y del padre de la guitarra española moderna el almeriense don Antonio de Torres Jurado. La recuperación de todo el conocimiento físico involucrado en el diseño, la construcción y caracterización de este instrumento, así como la recuperación de la rica historia del mismo definen nuestra idea como un abordaje *holístico* de clara inspiración STEAM.

6. Antecedentes (investigaciones o estudios existentes en la materia)

Dado que la propuesta de trabajo del equipo no corresponde a un proyecto de investigación o indagación sino de producción de cierto material escrito de corte

“aplicado-experimental” relacionado con ciertas temáticas de física y su enseñanza, así como de posibles intersecciones con otras disciplinas o campos de saber que sirva de apoyo a integrantes de comunidades educativas, los antecedentes a los que se hará referencia remiten a otras entidades de similar naturaleza.

Listamos algunos de los recursos didácticos que se han generado desde nuestro país y que tienen puntos de contacto con la problemática que se pretende abordar. El primero de ellos fue el Taller “La Física de la Música” que los profesores y Doctores en física Stelio Haniotis e Ismael Núñez brindaron en el XIII Encuentro Nacional de Profesores de Física (APFU, Tacuarembó, setiembre de 2003). Parte de los contenidos temáticos del mismo pueden consultarse en Haniotis & Núñez (2004).

Posteriormente encontramos: videos enmarcados en el I Encuentro Virtual de Profesores de Física, organizado por la Asociación de Profesores de Física del Uruguay (APFU): *El origen (matemático) de la Música* (Núñez) (APFU-a (2020)), *Luces, cámara, ... la física en acción* (Coirolo & Casais) (APFU-b (2020)); el libro electrónico *Material teórico-práctico para el curso de física* (Acosta et al. (2020)); sitios web de profesores de física como Baccino (2012), Monteiro (2020), Parrella (2020); material para el seminario *Espacio interdisciplinario: Sonido y Acústica Musical* para la formación de grado de profesores de física en el IPA (Baccino, 2011).

Mencionamos, a modo de ejemplo, artículos publicados recientemente por autores locales en diversos medios: *Almacenamiento de sonido: el disco de vinilo vs. el formato digital* (Núñez, 2019), *Velocidad del sonido y pérdidas de energía en tubos cilíndricos* (Echegarri, 2019), *Una botella de té como resonador universal de Helmholtz* (Monteiro et al., 2018).

7-8. Justificación e Hipótesis

“La física que enseñamos en nuestros cursos secundarios adolece de dos problemas muy importantes: es muda y monocromática; no tiene sonido ni colores.”
Dr. en física Mayo Villagrán.

La afirmación del encabezado, compartida en una conferencia del XV Encuentro Nacional de Profesores de Física (2005, Minas, Departamento de Lavalleja) de la APFU, disparó nuestra inquietud de lograr acercar los contenidos de física a los estudiantes a través de una herramienta artística: la música. Si bien estrictamente hablando las temáticas citadas se integraron a la currícula de Física de 2°BD de Arte y Expresión a partir de la Reformulación 2006 las mismas siguen siendo esquivas a la enorme mayoría de los estudiantes de la asignatura en el ciclo secundario.

Recientemente (APFU-b (2020)) el Dr. Ismael Núñez, especialista en Acústica y docente de larga trayectoria en nuestro medio, se refirió a uno de los aportes que la Música puede hacer a la Enseñanza de la Ciencia en general y de la física en particular. El planteo del experto refiere a que la Música y los instrumentos musicales constituyen, en su opinión, uno de los campos de conocimiento que pueden favorecer el acercamiento de las personas a la Ciencia, en particular de los jóvenes.

En la misma línea, los docentes recogemos cotidianamente evidencia empírica,

que a su vez es respaldada por la investigación didáctica (por ejemplo, Polino (2012)), referida a la escasa afinidad que tienen los alumnos con las clases de Ciencias en general y de física en particular.

A partir de lo anterior resulta pertinente, desde la mirada docente, desarrollar estrategias que favorezcan el acercamiento de los jóvenes a la Ciencia.

Consideremos además la conveniencia de que las propuestas involucren aspectos multisensoriales y no solamente el sentido de la vista, como ocurre de forma habitual en nuestras clases. Caracterizamos a nuestra propuesta como “aplicada-experimental”, en el sentido que involucra primordialmente un enfoque aplicado de la física y otro experimental, en el ámbito de la Acústica musical. Esperamos poder desarrollar en nuestro trabajo aspectos que involucren adicionalmente a los sentidos del oído y del tacto, que impliquen desarrollos motores, como herramientas que habiliten canales de aprendizaje que son menos habituales en nuestra práctica.

Si bien uno de los espacios curriculares en el cual los actores podrían apropiarse de propuestas de este trabajo es la orientación *Arte y Expresión* (una de las opciones de bachillerato que ofrece el actual Plan 2006 de enseñanza media de Educación Secundaria) en nuestra opinión los productos de esta propuesta podrán considerarse además en el tratamiento de las temáticas con enfoques extracurriculares o interdisciplinarios dentro del ámbito de la enseñanza media superior. Incluso, considerarlo ante la posibilidad de revisar el plan de enseñanza media básica, o en posibles espacios de intercambio con docentes de enseñanza primaria. Compartiendo la opinión del Dr. Núñez, y el objetivo de facilitar el acercamiento de la Ciencia a los jóvenes, este trabajo podría constituir un aporte en ese sentido.

9. Marco Teórico.

Respecto al papel de las actividades experimentales, elemento central dentro del trabajo que se proyecta, Carvalho (1998) plantea que la principal función en las aulas es “*ampliar el conocimiento del alumno sobre los fenómenos naturales y hacer que él los relacione con su manera de ver el mundo*”. Esta idea de actividad experimental traspasa notablemente la simple manipulación de materiales. Durante las etapas de reflexión sobre cómo (hacer consciente sus acciones) y por qué (explicaciones causales), es que el alumno tiene la oportunidad de construir conocimiento físico genuino. En esta línea, se hace acuerdo con lo expresado en el último Documento de trabajo # 4 de APFU (2015): “*Reivindicamos y hacemos énfasis en que la Física es una disciplina de carácter experimental, y en función de ello hay que pensar y elaborar respecto a su enseñanza. De esta manera se da real sentido al trabajo en la misma*”.

10. Fundamentación de la importancia o relevancia del proyecto para la educación, y resultados esperados.

Por una parte, se espera disponer de material que apoye los cursos curriculares

actuales que tratan las temáticas *Oscilaciones, Ondas, Acústica Musical*, por ejemplo, en los cursos de Física de 4to año (1º BD) o bien de la orientación Arte y Expresión en el Plan vigente (CES). En el marco de la justificación anterior, se considera un importante aporte para estudiantes y docentes, disponer de un conjunto de sugerencias guía para indagar sobre la acústica de instrumentos musicales.

Por otro lado, y partiendo de valorar positivamente la organización del conocimiento académico en disciplinas, y, desde éstas, vale considerar los abordajes interdisciplinarios de los objetos-problema de enseñanza. La temática y enfoque de este trabajo podría contribuir a ello. Incluir en la educación de jóvenes estas perspectivas, es importante tanto para aquellos que continúen trayectos en educación terciaria, como para la formación de ciudadanos alfabetizados científicamente.

11. Objetivos generales.

- Producir material escrito sobre temas de Acústica musical desde un enfoque experimental, dirigido a comunidades educativas de nuestro medio.
- Contribuir a los procesos de enseñanza-aprendizaje de los actores de dichas comunidades educativas.

12. Objetivos específicos.

- Diseñar y/o adaptar actividades experimentales dentro del campo de la Acústica Musical.
- Redactar materiales dirigidos a estudiantes y docentes referidos a las actividades experimentales.
- Elaborar una guía tutorial para la construcción y caracterización de un prototipo de guitarra española³.
- Generar insumos que habiliten a abordajes no curriculares, interdisciplinarios, o no previstos en la currícula actual.

³ En el desarrollo del proyecto decidimos construir dos versiones del prototipo las cuales difieren en los materiales de aros y fondo. Esto se hizo para profundizar la investigación haciendo un estudio comparativo entre ellas.

1

Fundamentos seleccionados

Introducción

La física del sonido se conoce como *acústica*. La rama que estudia la física de la música y por ello el sonido producido por los instrumentos musicales se conoce como *acústica musical*. Como esta investigación se refiere a dicho campo de conocimientos el concepto inicial que debemos definir es el de *sonido*: en un sentido muy general podríamos decir que se trata de cualquier oscilación mecánica que sea detectada por nuestro sentido del oído⁴. Dicha oscilación se propaga hasta nosotros como una onda longitudinal⁵ por cualquier medio material en sus fases tanto sólida como líquida o gaseosa.

Cuando estudiamos acústica a menudo decimos que todos los objetos que emiten sonido vibran, pero no todo lo que vibra emite sonido. Esto se debe a que somos capaces de escuchar frecuencias (magnitud física que cuantifica la cantidad de oscilaciones por segundo y se expresa en Hertz) en el rango (aproximado y en términos muy generales ya que cada persona tiene sus características particulares) de 20 Hz a 20.000 Hz (algunos autores sitúan los límites entre 16 Hz y 18.000 Hz). Los sonidos con frecuencias inferiores a dicho rango se denominan *infrasonidos*⁶ y aquellos con frecuencias superiores se los conoce como *ultrasonidos*. Este rango disminuye con la edad por la *presbiacusia* condición que consiste en que se dejan de escuchar las frecuencias altas⁷.

La respuesta del oído al nivel de intensidad del sonido no es plana: tenemos diferente sensibilidad dependiendo de la frecuencia. Para tener la misma percepción de *sonoridad* para frecuencias muy bajas y muy altas necesitamos mucho más *nivel de sonido* que para frecuencias en el entorno de los 3000 Hz las cuales percibimos muy eficientemente. En pocas palabras: si queremos escuchar 3000 Hz necesitamos muy poco “volumen” y, por el contrario, para escuchar sonidos próximos y por encima de 20 Hz o sonidos próximos y por debajo de 20.000 Hz el “volumen” deberá ser mucho mayor.

Luzuriaga (2006) cita una curiosidad ya que parece existir un umbral que divide la percepción visual de la auditiva. Cuando un objeto vibra lentamente no podemos escucharlo, pero lo vemos oscilar, mientras que cuando su frecuencia supera los 16 Hz (aproximadamente) dejamos de verlo y comenzamos a oírlo.

⁴ Hablamos de “sentido del oído” y no solamente de “oído” ya que la detección de un sonido involucra al sistema formado por el oído, el nervio auditivo y el cerebro: un conjunto muy complejo de componentes que se retroalimentan.

⁵ En este tipo de ondas las partículas del medio vibran en la dirección de la propagación de la perturbación.

⁶ Este tipo de vibraciones no las podemos escuchar con nuestro sentido de la audición, pero existe cierta evidencia que las podríamos detectar de otras formas: frecuencias bajas (del orden de los 7 Hz) pueden producir oscilaciones en nuestros órganos internos y secciones del oído siendo sus efectos potencialmente peligrosos a partir de grandes niveles de sonido producidos por modos estacionarios excitados en recintos cerrados según Hecht (2001) y Blatt (1991). Existe un relato de un experimento masivo en 2003 en el cual una audiencia que escuchaba música fue sometida a sonidos de 17 Hz sin saberlo. Una encuesta realizada a posteriori reveló que el 22% de los espectadores afirmó haber tenido sensaciones de tristeza, incomodidad, repulsión y/o miedo durante la emisión.

Existen órganos en algunas iglesias cuyos tubos de 32 pies emiten 16,35 Hz. Incluso el Gran Órgano (1890) del Ayuntamiento de Sydney (Australia) es capaz de emitir 8,18 Hz con su tubo de 64 pies (lo cual corresponde a la nota C₄). Evidentemente los luthiers de estos instrumentos sabían mucho más que nosotros acerca de las sensaciones que podrían producir todas las vibraciones (no solo sónicas sino infrasónicas) en un auditorio.

⁷ Este hecho involucra una anécdota interesante. Sobre 2008 se generó una gran polémica en Reino Unido por “El Mosquito”, un dispositivo inventado por el Ig Nobel de la Paz 2006 Howard Stapleton, que se instalaba en comercios que querían ahuyentar a los adolescentes y jóvenes. Funcionaba de manera muy sencilla: al producir un sonido de frecuencia muy alta la emisión suponía un ruido insoportable para dichas personas mientras que los adultos no la escuchaban (Mosquitono Wikipedia).

Según Serway (2010) “se cree que la compleja estructura del oído humano está relacionada con el hecho de que los mamíferos se desarrollaron de criaturas provenientes del mar. En comparación, los oídos de los insectos son considerablemente más simples en diseño porque los insectos han sido siempre residentes de la tierra”.

De acuerdo a la definición dada más arriba y para dar marco a nuestro trabajo debemos introducirnos en los movimientos que dan origen al sonido: las oscilaciones (o vibraciones).

Oscilaciones

A modo de introducción general podríamos decir que los tipos de movimientos más sencillos que podemos estudiar son aquellos que se desarrollan en una dimensión, las traslaciones, los movimientos rectilíneos, es decir, aquellos que describe una partícula material cuya trayectoria es una línea recta:

- Si la velocidad no cambia en valor (módulo) ni sentido, estamos ante un Movimiento Rectilíneo Uniforme (MRU): se produce cuando la fuerza neta sobre el cuerpo es nula.
- Un grado superior de dificultad suponen aquellos donde los cambios de valor de velocidad son constantes en el tiempo y entonces hablamos de Movimiento Rectilíneo Uniformemente Acelerado (MRUA): para obtenerlos deberá actuar sobre el cuerpo una fuerza neta constante en la dirección de la trayectoria.
- En un tercer nivel se encuentran los movimientos oscilatorios periódicos: en ellos la partícula se desplaza alternativamente en un sentido y en otro una distancia llamada *amplitud* A (que expresamos en metros) medida con respecto a cierta posición de equilibrio⁸: oscila entre los extremos $+A$ y $-A$. El movimiento se repite a un ritmo fijo luego de un intervalo de tiempo llamado *Período* T (que expresamos en segundos) o, lo que es equivalente, vibra al inverso de aquel a una *frecuencia* f (que expresamos en ciclos por segundo, s^{-1} o *Hertz*) constante.

$$f = \frac{1}{T} \quad (\text{ec.1})$$

Oscilaciones libres y libres amortiguadas

Desde el punto de vista físico la más simple de esta clase de oscilaciones (a las cuales denominamos *libres*) se obtiene cuando actúa sobre el cuerpo (al que llamaremos *oscilador armónico*⁹) una *fuerza restauradora*¹⁰ y al movimiento resultante se lo conoce como *Movimiento Armónico Simple (MAS)*: en él la frecuencia es constante (definida por las características físicas del sistema) y no depende de la amplitud.

La ecuación $x = f(t)$ que lo describe es:

$$x = A \cdot \text{sen}(\omega_0 \cdot t + \varphi) \quad (\text{ec.2})$$

siendo la frecuencia angular:

⁸ Es por ello que se la define como posición de equilibrio estable.

⁹ debido a que su cinemática queda descrita por funciones seno y coseno.

¹⁰ Que definimos como aquella que acelera al cuerpo hacia la posición de equilibrio.

$$\omega_0 = 2\pi f \quad (\text{ec.3})$$

(la cual depende de la frecuencia f) y la fase inicial φ (la cual define las condiciones iniciales) (Resnick, 1980). La figura 1.1 muestra un posible gráfico posición tiempo ejemplo.

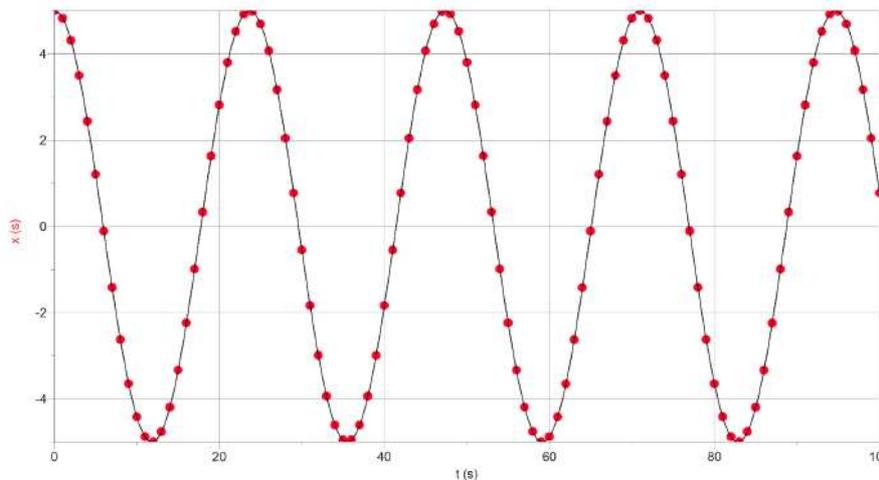


Figura 1.1. Gráfico posición tiempo de un movimiento armónico simple. Los datos provienen de una simulación.

Nota: Si bien desde el punto de vista práctico el mecanismo oscilatorio más fácil de montar es un péndulo, su cinemática es más complicada: el movimiento que describe no es un MAS: no es rectilíneo y su frecuencia depende de la amplitud.

Si consideramos los movimientos que se desarrollan en dos dimensiones, es decir aquellos cuya trayectoria está contenida en un plano, uno de los más sencillos es el *Movimiento Circular Uniforme (MCU)*, cuya trayectoria es una circunferencia. Se trata de un movimiento acelerado en el cual la velocidad no cambia de valor, pero sí de dirección y sentido en forma permanente. Se obtiene cuando actúa sobre el cuerpo una fuerza neta de módulo constante y dirección y sentido variables conocida como *fuerza centrípeta* (siempre dirigida hacia el centro de la trayectoria).

Es importante destacar que estos dos últimos (*MAS* y *MCU*) son movimientos que podemos reproducir en un laboratorio de nivel secundario de forma permanente ya que sus trayectorias están acotadas.

Ambos están íntimamente vinculados ya que el *MAS* se puede considerar como la proyección del *MCU* que describe una partícula sobre una dimensión. La forma más sencilla de obtenerlo es montar una rueda girando a velocidad constante y bajas revoluciones, fijar un índice en su borde y perpendicular al plano de giro, e iluminarlo con luz solar (haz de rayos paralelos) de dirección perpendicular al eje de giro de manera de obtener la sombra del índice en cualquier superficie perpendicular al haz.

Si queremos obtener en el laboratorio un mecanismo que describa un *MAS* el montaje es más complicado. Deberá diseñarse un *yugo escocés*, dispositivo que produce un *MAS* a partir de un *MCU*. Podría pensarse que lo más simple sería armar un mecanismo *biela-manivela*, pero en ese caso el movimiento oscilatorio que se observa, si bien es rectilíneo y periódico, no es un *MAS*.

¿Qué sistema físico describe un MAS?

El sistema buscado debe contar con un componente inercial (que aporte una masa m , capaz de transportar energía cinética) y un componente elástico (que aporte elasticidad, capaz de almacenar energía potencial elástica) por separado.

Ciertos cuerpos unidimensionales con comportamiento elástico, sometidos a una fuerza F_x tienen deformaciones Δx tales que responden a la ley de Hooke:

$$k = - \frac{F}{\Delta x} \quad (\text{ec. 4})$$

Un ejemplo (modelo) de sistema con este comportamiento está conformado por un cuerpo puntual unido a un segundo cuerpo unidimensional elástico sin masa. Las fuerzas disipativas como los rozamientos internos y externos deben ser nulas: todo lo anterior indica que se trata de un sistema ideal. Su frecuencia angular ω_0 queda definida por las características elásticas e inerciales según:

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m} \quad (\text{ec.5})$$

Entonces el planteo será intentar obtener el sistema físico real que mejor se aproxime a las características enumeradas. Para obtenerlo en un laboratorio podrían montarse los siguientes elementos: el cuerpo que aporte masa puede ser una pesa esférica de material denso (acero, por ejemplo) que colgaríamos verticalmente de un objeto elástico fijo al techo como podría ser un alambre metálico (el cual quedaría sometido a tracción) cuya masa sea lo más pequeña posible con respecto a la del cuerpo colgante.

Pero con este sistema se obtendrían deformaciones inobservables. Es por ello que lo más común es utilizar un alambre, pero en forma de resorte helicoidal basándonos en la propiedad de que es más sencillo producir deformaciones torsionales que longitudinales ya que el módulo de corte de un material dado es, normalmente, 2 a 3 veces menor que el módulo de elasticidad (Hetch, 2001).

Resumiendo: un sistema masa-resorte sería el que encontraríamos como más adecuado para describir un MAS.

Sin embargo, cuando se monta dicho sistema (cuidando que las oscilaciones queden confinadas a la vertical evitando los movimientos pendulares) pueden observarse dos modos de oscilación: una oscilación vertical como la esperada y otra en la cual la pesa oscila angularmente (como consecuencia de que el resorte presenta una deformación angular conforme oscila verticalmente). Ambos movimientos están acoplados por lo cual si los períodos son muy próximos puede observarse una alternancia entre un movimiento netamente vertical y otro netamente angular: estamos en presencia del *péndulo de Wilberforce* (Wilberforce, 1894).

Aun atendiendo las observaciones anteriores nuestro sistema podrá describir un movimiento oscilatorio de frecuencia única pero no se tratará de un MAS ya que es imposible evitar “pérdidas” de la energía inicial debidas a las fricciones internas y los rozamientos con el aire: será un *Movimiento Oscilatorio Amortiguado (MOA)*. Lo consideraríamos un MAS en primera aproximación solamente si analizamos breves intervalos de tiempo en sistemas con disipación mínima.

Un modelo de movimiento oscilatorio amortiguado (unidimensional) define la fuerza disipativa f directamente proporcional a la rapidez v ¹¹:

$$f = -b \cdot v \quad (\text{ec. 6})$$

El decaimiento está caracterizado por el parámetro gamma γ ¹²:

$$\gamma = \frac{b}{m} \quad (\text{ec. 7})$$

En la ecuación 7, m es la masa del cuerpo. El valor del coeficiente γ en relación a la frecuencia natural ω_0 de oscilación puede generar una *oscilación amortiguada*¹³ (Franco García, 2016b). Cuando $\gamma < \omega_0$ se tiene una oscilación de frecuencia constante y amplitud decreciente, como la que se muestra en el gráfico de la figura 1.2.

$$x = A \cdot e^{-\frac{\gamma t}{2}} \cdot \cos(\omega t + \varphi) \quad (\text{ec. 8})$$

para el caso particular de:

$$\omega^2 = \omega_0^2 - \frac{\gamma^2}{4} \quad (\text{ec.9})$$

de valor menor a la frecuencia angular no amortiguada ω_0 . Para aplicar lo anterior a la enorme variedad de sistemas físicos que presentan estas *oscilaciones libres amortiguadas* es habitual introducir un parámetro llamado *factor de calidad Q* para caracterizar el nivel de amortiguación dado por:

$$Q = \frac{\omega_0}{\gamma} \quad (\text{ec.10})$$

Se trata de un número puro y en los casos en los cuales presenta un valor muy alto podemos hacer la aproximación $\omega_0 \approx \omega$ (French, 1991).

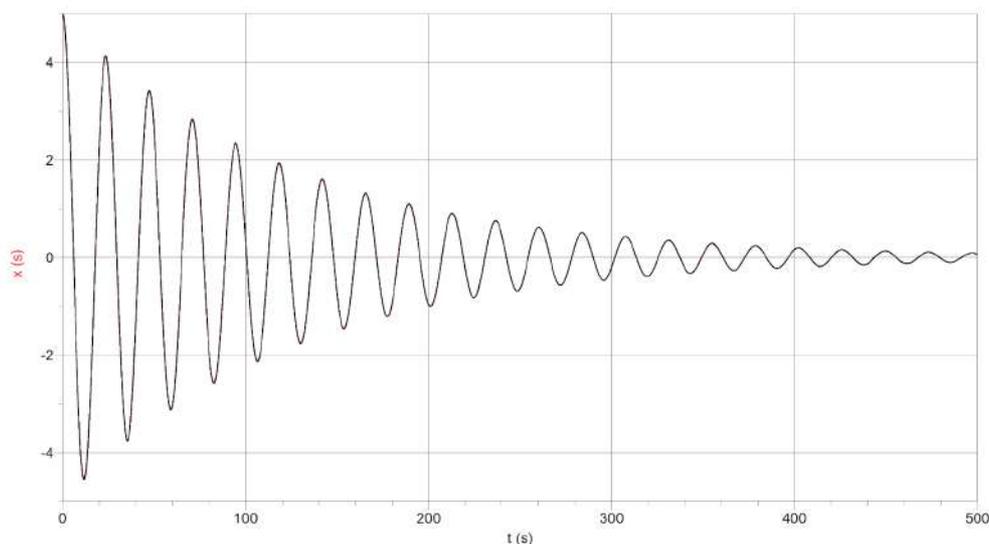


Figura 1.2. Posición vs. tiempo en un movimiento oscilatorio amortiguado. Los datos del gráfico surgen de la simulación para un sistema masa-resorte.

¹¹ Puede consultarse en Suárez y Vachetta (2015) el modelo de una fuerza disipativa de módulo constante.

¹² En acústica musical es común utilizar un factor de decaimiento con el mismo nombre de la mitad de este valor.

¹³ Algunos autores llaman *subamortiguamiento* a esta familia de soluciones.

Oscilaciones forzadas y resonancia

Una forma de excitar un oscilador armónico es mediante una fuerza que varíe con el tiempo también en forma armónica según:

$$F = F_0 \cdot \cos(\omega' \cdot t) \quad (\text{ec.11})$$

¿Cómo se moverá el sistema excitado entonces?

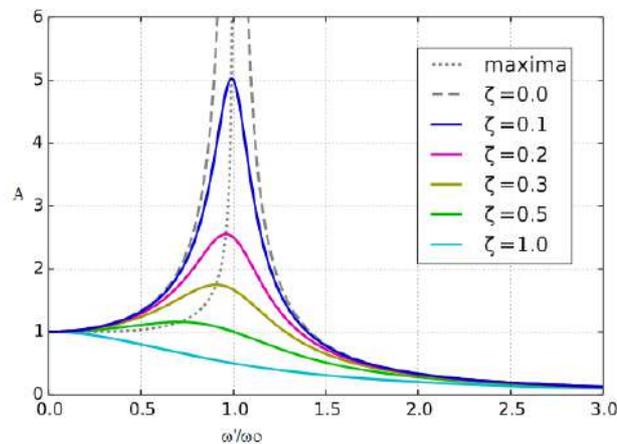


Figura 1.3 Gráfico de respuesta resonante: modelo de un sistema amortiguado caracterizado por diferentes coeficientes de amortiguamiento.

La respuesta del sistema tendrá, en el caso general, una componente *transitoria* y otra *estacionaria*, por lo cual la solución será la suma. Si se trata de un oscilador libre coexisten ambas mientras que si es libre amortiguado al cabo de un tiempo la primera desaparece. Es por ello que nos concentraremos en analizar la segunda. El movimiento resultante de la excitación es un *MAS* de frecuencia ω' pero su amplitud dependerá de la relación que exista entre los valores de la frecuencia angular excitadora ω' y de la frecuencia angular no amortiguada ω_0 : la razón $\frac{\omega'}{\omega_0}$. La forma más sencilla de sintetizar todas las posibilidades, es decir, sistema sin amortiguación y con amortiguaciones de valores crecientes (medidos por el parámetro ζ) es mediante la gráfica de la figura 1.3 que representa una respuesta resonante.

Podemos ver que en el eje vertical están representados valores proporcionales a la amplitud del sistema excitado para diferentes valores de la razón $\frac{\omega'}{\omega_0}$. En todos los casos se observa que la amplitud es pequeña para razones $\frac{\omega'}{\omega_0}$ lejanas tanto por debajo como por encima del valor 1 (valores de ω' lejanos a ω_0). Sin embargo, crece en forma notable cuando la razón $\frac{\omega'}{\omega_0}$ se aproxima a la unidad (valor de ω' próximo al de ω_0): para todos los casos se presenta un máximo en la amplitud para un valor específico de la razón $\frac{\omega'}{\omega_0}$. A este fenómeno (en el cual el sistema responde en forma *selectiva* a la frecuencia) se le

llama *resonancia* y llamamos ω_R al valor de frecuencia para el cual la amplitud toma su valor máximo^{14 15}.

Este comportamiento que podemos denominar *respuesta resonante* tiene una importancia enorme en un rango muy amplio de áreas dentro de la física como mecánica, acústica, óptica, electromagnetismo, física cuántica, etc.; por lo cual se estudia con detalle para sistemas mecánicos para luego extrapolar los resultados.

Analicemos con más detalle la gráfica (figura 1.3): para osciladores sin amortiguación (curva a trazos) podemos ver que $\omega_R = \omega_o$ y en la resonancia la amplitud se hace infinita.

Para el caso de sistemas amortiguados, ω_R toma valores inferiores a ω_o ¹⁶ ($\omega_R < \omega < \omega_o$) y el máximo de la amplitud depende del factor γ o su correspondiente Q . Valores altos de Q producen curvas más agudas con máximos de valores altos mientras que, por el contrario, valores bajos de Q producen curvas más aplanadas.

Existen muchas variedades de montajes para mostrar el fenómeno de resonancia mecánica: para aplicaciones cuantitativas debe contar con un oscilador armónico (como el *yugo escocés* antes descrito) o, para aplicaciones cualitativas, con aquellos que presenten desplazamientos lineales como en la *Torre de Texas* (French, 1991); (Daedalon, 1993) o angulares como en el *Péndulo de torsión de Pohl* (Leybold, 2011); (Barnech et al., 2002). En ellos debe poder ajustar la frecuencia excitadora en un rango amplio tanto por encima como por debajo de la frecuencia natural de oscilación del sistema a excitar. El movimiento resultante puede registrarse y analizarse a partir de la filmación y el uso de algún software como *Tracker* (Brown et al., 2022) o *Logger Pro* (2022).

Resonancia de Helmholtz

Supongamos que disponemos de una cavidad de forma arbitraria, de paredes rígidas, que tiene un cuello de largo L , adosado a un orificio con área A , como mostramos en la figura 1.4. En el interior de la cavidad hay un volumen V_o de aire que se encuentra a la presión atmosférica P_o .

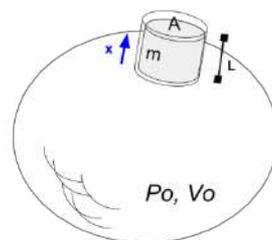


Figura 1.4. Esquema de un resonador de Helmholtz simple.

¹⁴ Según Capra (2008), una de las primeras referencias a este fenómeno se puede encontrar en los escritos de Leonardo Da Vinci.

¹⁵ La resonancia puede definirse también tomando otra magnitud que se maximiza (por ejemplo, la velocidad) al ajustar la frecuencia. Estas definiciones no son equivalentes.

¹⁶ Es interesante indicar que, estrictamente hablando, la frecuencia de resonancia no coincide ni con la de la oscilación amortiguada ni con la de la oscilación libre, aunque para Q altos pueden considerarse las tres prácticamente iguales.

Consideraremos nuestro objeto de estudio, en principio, la masa de aire m que se encuentra en el cuello. Su movimiento está asociado a los cambios de presión y volumen en el interior de la cavidad. Las oscilaciones del aire en el interior de la cavidad son suficientemente rápidas como para modelarlas como adiabáticas, de forma que la presión y el volumen se vinculan mediante¹⁷: $P \cdot V^\gamma = \text{constante}$.

Si se toman variaciones en la ecuación anterior, se escribe la variación de presión en el interior y se expresa la fuerza neta sobre el elemento de masa m , se obtiene una expresión análoga a la *ley de Hooke* para cierto tipo de resortes. La fuerza resultante depende linealmente de la posición x , de forma que al aplicar la segunda ley de Newton se obtiene una ecuación diferencial que corresponde a una oscilación libre en una dimensión,

$$\ddot{x} + \frac{\gamma P_0 A}{\rho L V_0} x = 0$$

En el coeficiente de la ecuación diferencial se ha puesto, a modo de primera aproximación, los valores de equilibrio de la presión y el volumen, P_0 y V_0 respectivamente; asumiendo que sus variaciones son pequeñas en relación a sus respectivos valores de equilibrio. Para ver en detalle el procedimiento que devuelve la frecuencia ω_H el lector puede consultar Kinsler (1995, 297)

El factor que multiplica el segundo término corresponde al cuadrado de la frecuencia del oscilador,

$$\omega_H^2 = \frac{\gamma P_0 A}{\rho L V_0}$$

La expresión puede simplificarse si se la escribe en términos de la velocidad c de propagación del sonido en un gas, evaluándose para la densidad de equilibrio ρ_0 ,

$$\omega_H = c \sqrt{\frac{A}{L V_0}} \quad (\text{ec.12})$$

Dado que desde el orificio se radia sonido, existe una inercia efectiva mayor que la asociada a la masa m . Esto es equivalente a decir que la longitud L es mayor que la del cuello. De otra forma, el fenómeno se da, aunque el cuello no esté presente, como en la boca de una guitarra. “Una abertura que consiste en un agujero en una pared delgada del resonador tendría una longitud efectiva $L' = 1.7a$, siendo a el radio de la abertura circular” (Kinsler et al., 1995).

¹⁷ En esta sección, el símbolo "gamma" representa el coeficiente de dilatación adiabática del aire: razón entre las capacidades caloríficas a presión constante y a volumen constante.

Vibraciones mecánicas en medios extensos

El problema de las vibraciones mecánicas en medios extensos se plantea usualmente desde la aplicación de las leyes de Newton a un elemento del medio y se opera hasta obtener una ecuación diferencial en derivadas parciales cuyas soluciones pueden tener dificultades variables dependiendo del medio en particular.



Figura 1.5 a) Imágenes de metalófono (izquierda) y b) caja de música (derecha).

En principio, en este trabajo nos interesa conocer las frecuencias de los modos de oscilación de cuerpos extensos (cuerdas, barras, placas, volúmenes de aire) que se dan cuando se imponen ciertas condiciones de borde. A modo de ejemplo, nos interesa conocer las frecuencias a las que se producen los modos normales¹⁸ (o propios) de oscilación transversal de una barra (o varilla): en particular las frecuencias que se observan en una barra libre en ambos extremos (con las que se puede modelar los elementos de un metalófono) (figura 1.5 a) y las frecuencias a las que se producen los modos cuando uno de sus extremos es libre de oscilar y el otro se encuentra fijo empotrado (con las que se puede modelar los elementos del *peine* que emite sonidos en una cajita de música (figura 1.5 b).

En lo que resta de esta sección sintetizamos, desde las fuentes citadas, resultados de la aplicación de la mecánica de Newton a algunas situaciones de interés para este trabajo.

Vibraciones transversales en una cuerda tensa

"Se dice que Pitágoras descubrió el hecho de que dos cuerdas similares bajo la misma tensión y que difieren sólo en la longitud, cuando suenan juntas dan un efecto que es agradable al oído si las longitudes de las cuerdas están en la proporción de dos números enteros pequeños."

"El descubrimiento de Pitágoras fue el primer ejemplo, fuera de la geometría, de cualquier relación numérica en la naturaleza. Debe haber sido muy sorprendente descubrir de repente que había un hecho de la naturaleza que involucraba una simple relación numérica."

Medidas simples de longitudes dieron una predicción sobre algo que aparentemente no tenía conexión con la geometría: la producción de sonidos agradables. Este descubrimiento llevó a la extensión de que quizás una buena herramienta para comprender la naturaleza sería el análisis aritmético y matemático. Los resultados de la ciencia moderna justifican ese punto de vista."

"En este descubrimiento de los griegos, están los tres aspectos: experimento, relaciones matemáticas y estética. La física ha hecho grandes progresos sólo en las dos primeras partes."
(Feynman, 1963)

¹⁸ Vea en la sección subsiguiente cómo caracterizamos un *modo normal*.

El padre de Galileo, Vincenzo Galilei, destacado músico, compositor y teórico musical, hizo importantes descubrimientos en el campo de la acústica, especialmente los que se refieren a la física que implica la vibración de cuerdas y columnas de aire. Es posible que fuera el primero en establecer que la relación entre la tensión de una cuerda y su frecuencia de vibración no seguía una ley física lineal (Galilei, V., 2022).

Consideremos el caso bien conocido de una cuerda estirada con una tensión T . Si se produce un desplazamiento transversal en algún lugar de la cuerda, se observa la propagación de una onda, alejándose del lugar en que se generó. La velocidad de propagación de la onda depende de la tensión T y de la densidad lineal de masa ρ_L de la cuerda, y está dada por:

$$c = \sqrt{T/\rho_L}$$

Si se planea un análisis dinámico para caracterizar el movimiento de un elemento genérico de la cuerda, como el mostrado en la figura 1.6, se obtiene una ecuación diferencial en derivadas parciales de segundo orden que se llama usualmente *ecuación de onda*. Las soluciones de esta ecuación que satisfacen las condiciones iniciales y de frontera adecuadas a la situación completan la descripción del movimiento de la cuerda.

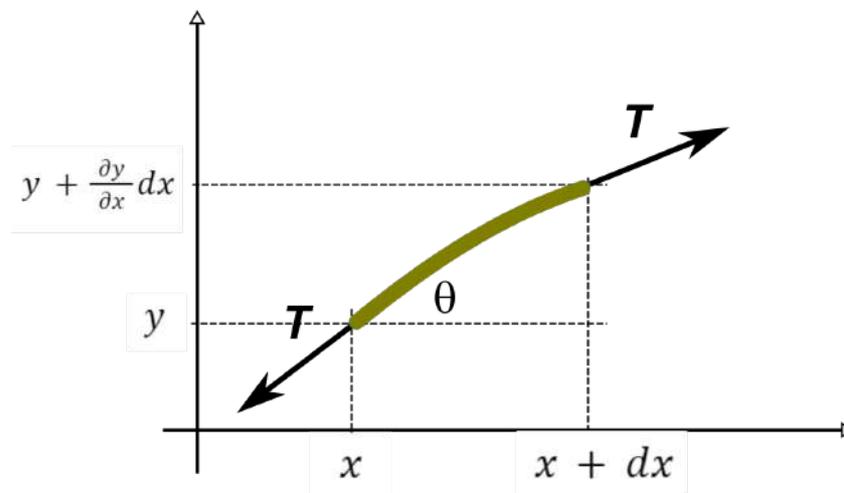


Figura 1.6. Un elemento de una cuerda sometido a tensión (Kinsler et al., 1995).

Una forma de obtener la ecuación de onda puede revisarse en Kinsler et al. (1995). El resultado de este proceso es:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

donde c^2 está definida por:

$$c^2 = T/\rho_L$$

La solución general a la ecuación de onda puede expresarse como la suma de dos funciones arbitrarias, cuyos argumentos tienen una forma particular:

$$y(x, t) = y_1(ct - x) + y_2(ct + x) \quad (\text{ec.13})$$

La función y_1 representa el movimiento de la forma, con velocidad c , en el sentido x *positivo*; la función y_2 representa el movimiento de la forma en sentido x *negativo* con velocidad de igual módulo.

El vínculo entre la velocidad de propagación c , la frecuencia f y la longitud de onda λ viene dada por la siguiente expresión:

$$c = \lambda \cdot f \quad (\text{ec.14})$$

Las funciones y_1 e y_2 están determinadas por los *valores iniciales* (posición y velocidad transversal de cada punto de la cuerda) y las *condiciones de frontera*. Por ejemplo, la forma inicial que se establece al golpear (o percutir) una cuerda (como en un piano) es muy diferente a la que se establece al pulsar una cuerda de guitarra. Las funciones también están determinadas por las condiciones de frontera que se definen en los extremos de la cuerda. En una situación idealizada en la que los soportes de los extremos se modelan como rígidos, la suma $y_1 + y_2$ está obligada a ser cero en todo instante de tiempo en las coordenadas donde se ubican los soportes.

Modos normales de una cuerda fija en ambos extremos

Presentaremos ahora la situación de una cuerda de longitud finita fija en ambos extremos¹⁹ y que se la excita pulsándola en algún lugar de su extensión (como en la ejecución típica de una guitarra) o percutiendo (como una cuerda de piano cuando se aprieta una tecla).

A partir del planteo de soluciones de prueba (Kinsler, 1995) y aplicando las condiciones de frontera: no hay desplazamiento transversal de la cuerda ($y=0$) en los extremos ($x=0$ y $x=L$); se obtienen valores discretos para el número de onda $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ y sus correspondientes valores permitidos para las frecuencias:

$$f_n = n \frac{c}{2L} \quad (\text{ec.15})$$

siendo n un número natural.

Puede mostrarse que la solución completa para una cuerda soportada rígidamente en sus extremos y vibrando libremente es de la forma:

$$y(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos \omega_n t + B_n \sen \omega_n t) \sen k_n x \quad (\text{ec.16})$$

Esta solución implica la superposición de todos los modos caracterizados por cada número natural n (modos normales o propios). Asociado a cada uno de esos modos hay una frecuencia que se llama frecuencia natural o frecuencia del modo normal n ésimo.

El modo normal con la frecuencia más baja (para $n = 1$) se llama *modo fundamental* y su valor es $f_1 = \frac{1}{2} \frac{c}{L}$. Las frecuencias correspondientes a los modos superiores ($n = 2, 3, 4, \dots$) se llaman *sobretonos*. En el modelo idealizado que estamos considerando aquí las frecuencias de los modos superiores son múltiplos enteros de la fundamental ($f_n = n f_1$) y en tal caso se llaman *armónicos*.

¹⁹ Las cuerdas de los instrumentos musicales no se ajustan estrictamente a este modelo, ya que en los lugares en los que se apoyan (en el caso de una guitarra será sobre la cejuela -inserta en el puente-, y sobre la ceja -al inicio del diapasón) transmiten vibraciones a otras partes del instrumento; por tanto, no pueden estar en reposo permanente. Un modelo que incluye estos aspectos puede consultarse en Kinsler et al. (1995).

Supongamos que se tira lateralmente de una cuerda de largo L a una distancia $L/2$ de uno de sus extremos, y luego se la deja en libertad desde el reposo. Pulsarla en ese lugar impide que puedan desarrollarse los modos que tienen nodos (puntos con desplazamiento transversal nulo en todo instante t) en esa posición. En este ejemplo, los armónicos asociados a un natural par no estarían dentro del conjunto de funciones superpuestas.

Las amplitudes de los coeficientes A_n y B_n se determinan a partir de las condiciones iniciales de cada problema. En nuestro ejemplo, en el que todos los puntos de la cuerda tienen velocidad nula en el instante $t = 0$ s, puede mostrarse que todos los coeficientes B_n de la ecuación 16 son nulos. En una condición inicial distinta podrán determinarse a partir de la aplicación del teorema de Fourier.

La figura 1.7 muestra el espectro del sonido emitido por una guitarra al pulsar una de sus cuerdas en un punto equidistante de los lugares en que está apoyada. Si observamos los picos comenzando por los que tienen mayor amplitud, encontramos uno en la frecuencia $f_1 = 331$ Hz, seguido por otro a la frecuencia $f_3 = 993$ Hz. Entre ellos se ubica uno con amplitud mucho menor que el último a una frecuencia aproximada a $2 \cdot f_1$; es decir, el segundo armónico casi no está presente en la señal analizada. Algo análogo ocurre con los siguientes modos pares visibles.²⁰



Figura 1.7. Primeros armónicos del sonido emitido por una guitarra al pulsar una de sus cuerdas en el punto medio (obtenido con *Advanced Spectrum Analyzer PRO*)

Si el modelo de los extremos completamente rígidos se sustituye por otro que considere, por ejemplo, el necesario movimiento del extremo efectivo de una cuerda de guitarra apoyada mediante una cejuela sobre el puente, se observan desviaciones de lo expuesto en el párrafo anterior. Una de las consecuencias de esta mirada más realista de la situación es que las frecuencias de los sobretonos dejan de ser múltiplos enteros de la fundamental: *los sobretonos no son armónicos de la fundamental*.

En el caso de cuerdas de piano en las que su rigidez a la flexión no pueda dejarse de considerar, los sobretonos serán más altos que lo predicho sobre la base del primer modelo. El efecto de la rigidez crece al aumentar la frecuencia, por lo que los sobretonos de una cuerda de piano real se vuelven más agudos en relación a la fundamental (Kinsler, 1995): esta desviación con respecto al modelo sencillo inicial se conoce como *inarmonicidad* y forma parte característica del sonido que emite el piano con lo cual define el *timbre* que nos permite identificarlo entre otros instrumentos.

²⁰ En la actividad 22 de la sección 4 ampliamos algunos de estos aspectos.

Aspectos complementarios a considerar para cuerdas reales

El modelo simple en primera aproximación aquí presentado prevé la excitación de parciales armónicos del fundamental. Sin embargo, es un hecho conocido (Crawford 1971, Richardson 1994, Jansson 2002, Rossing & Fletcher 2010) que las cuerdas reales por diversas razones se alejan de él presentando distintos grados de inarmonicidad.

La cuerda ideal de nuestro modelo primario es considerada (Crawford, 1971) continua (constituida por infinita cantidad de partículas), homogénea (de un único material, radio constante y sin imperfecciones) y flexible (que no presenta rigidez a las deformaciones transversales). Además, nos ocupamos de la condición de pequeñas oscilaciones. En el caso real deberemos considerarla como una varilla delgada y uniforme que sufre oscilaciones transversales (Murray & Whitfield, 2022). En este caso la relación $f_n = nf_1$ se modifica para tomar la siguiente forma:

$$f_n = nf_1 \sqrt{1 + Bn^2}$$

en la cual B se conoce como parámetro de inarmonicidad, el cual para una cuerda monofilamento de sección circular se puede obtener de:

$$B = \frac{\pi^3 \Upsilon r^4}{4TL^2}$$

De la expresión anterior se puede deducir que, para cuerdas de igual longitud L y compuestas por cierto material dado (identificado por el módulo de Young Υ) sometido a tensiones similares, las mismas tendrán valores de B que dependen fuertemente de su radio r : la cuerda tercera de una guitarra se encuentra en ese caso.

Más allá de lo anteriormente expuesto, un estudio completo de las cuerdas desde un punto de vista físico debería poder definir claramente qué características de los diversos materiales de encordados existentes en el mercado están asociados a los adjetivos ("dulces", "consistentes", "brillantes", "modernos", etc.) que los fabricantes atribuyen a los sonidos que se obtendrían con sus productos. También el laboratorio debería ser capaz de definir en qué consiste el "envejecimiento" que sufre una cuerda con el uso.

Columnas de aire en tubos

Consideremos un cilindro estrecho de paredes rígidas inmerso en el aire, tal que la columna de gas limitada por él pueda considerarse un medio elástico unidimensional por el que pueden propagarse ondas longitudinales. En el interior del tubo la presión puede variar en relación a la presión del "aire en calma". Si el tubo tuviera un extremo abierto (diríamos "libre" en el caso de una cuerda) la presión debe permanecer constante e igual a la presión del aire exterior.

Cuando se producen ondas sinusoidales en el interior de la columna, las condiciones de frontera descritas en términos de las variaciones de presión²¹ ΔP generan algunas frecuencias de oscilación permitidas. Los modos permitidos deben cumplir con el requerimiento de que exista un nodo de presión en cada extremo abierto y un antinodo de presión junto a la tapa (extremo cerrado). En la figura 1.8 se muestran representaciones

²¹ El comportamiento del aire puede describirse también en términos de desplazamiento de las moléculas en relación a la ubicación con aire en calma. En los lugares donde las variaciones de presión son grandes (como en el fondo tapado del tubo), los desplazamientos son nulos (en virtud de la rigidez de las paredes). Algo opuesto ocurre en el extremo abierto.

esquemáticas de un tubo de largo L y bosquejos de gráficos de la presión²² a lo largo del mismo para dos condiciones de borde: en (a) se tiene el caso en que ambos extremos están abiertos a la atmósfera, y en (b) aquel en el cual uno de los extremos está abierto y el otro cerrado.

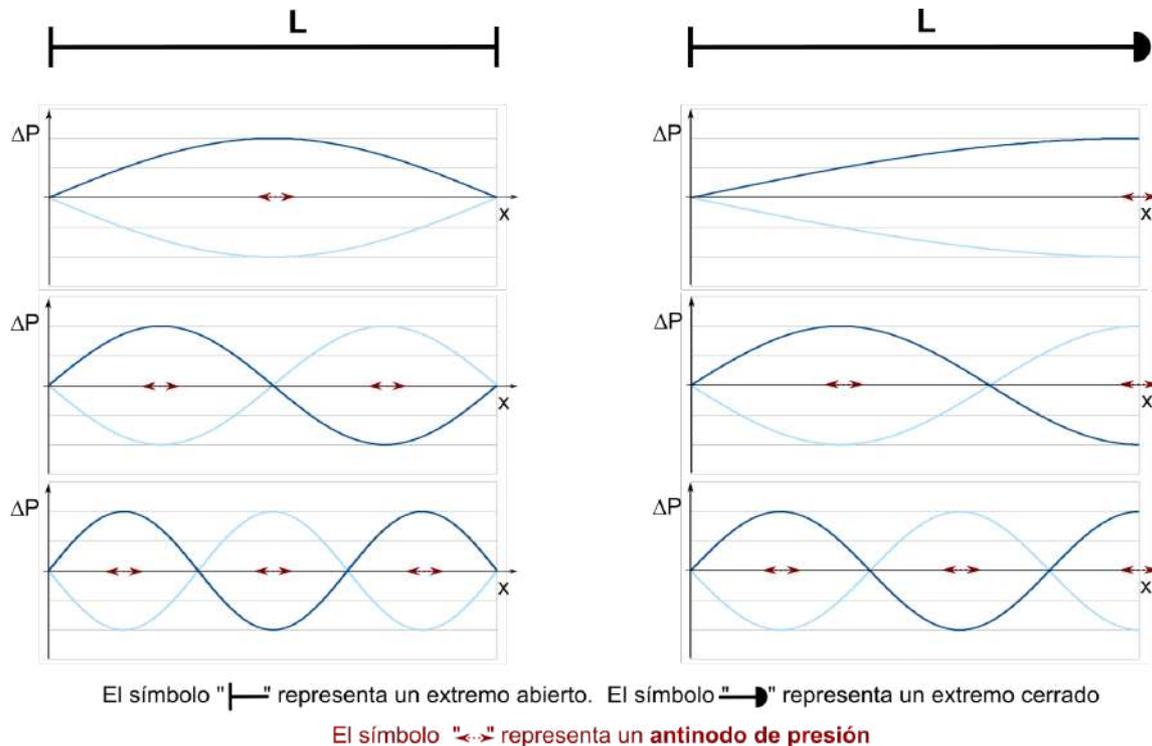


Figura 1.8. Modos de ondas en un tubo idealmente cilíndrico: (a) abierto en ambos extremos y (b) cerrado en el extremo $x = L$ y abierto en el extremo $x = 0$.

Pueden consultarse animaciones de estas situaciones en las que se destacan dos formas de representar el desplazamiento de las partículas, en el sitio de Russell (2020). Allí se visualiza esquemáticamente, que en las posiciones en que existe un nodo de presión (extremo abierto, por ejemplo) se localiza un antinodo de desplazamiento de las partículas del gas.

La rapidez del sonido en el aire²³ puede expresarse en términos de la temperatura absoluta t_A en la forma (Roederer, 1997):

$$v = 20.1 \sqrt{t_A}$$

en unidad m/s.

Tubo "cerrado-abierto"

En la representación (b) de la figura 1.8, el largo L de la columna debe coincidir con números enteros cuartos de longitud de onda. Esto restringe las frecuencias permitidas de los modos de vibración de una columna de aire idealizado en un tubo "cerrado abierto" de largo L , a valores que son múltiplos impares de la frecuencia fundamental f_1 , y que pueden expresarse:

²² Llamamos presión aquí a la presión manométrica, es decir la *variación de presión* en relación a la presión de equilibrio.

²³ El autor asume que el aire se comporta de forma suficientemente aproximada a un gas ideal.

$$f_n = n \frac{1}{4L} 20.1 \sqrt{t_A} \quad (\text{con } n = 1, 3, 5, \dots) \quad (\text{ec.17})$$

Tubo “abierto-abierto”

Si ambos extremos del tubo están abiertos, las condiciones de frontera generan un vínculo diferente entre la longitud del tubo L y las longitudes de onda permitidas. Lo que a su vez provee una sucesión de frecuencias permitidas para los modos de oscilación que pueden caracterizarse mediante la expresión:

$$f_n = n \frac{1}{2L} 20.1 \sqrt{t_A} \quad (\text{con } n = 1, 2, 3, \dots) \quad (\text{ec.18})$$

En este caso están permitidos todos los modos que sean múltiplos de la frecuencia del modo fundamental:

$$f_1 = (1/2L) * 20.1 \sqrt{t_A}$$

Aspectos complementarios a considerar para columnas de aire reales

Un aspecto que hay que considerar, en especial cuando se tienen tubos que no sean suficientemente estrechos (algunos tubos de órgano, por ejemplo), es que en los extremos abiertos los antinodos de desplazamiento no se dan exactamente en la boca del tubo. Una forma de proceder es mantener las relaciones anteriores y realizar una “corrección de extremo” de valor “0.3 * Diámetro del tubo” (Roederer, 1995, 156), por cada extremo abierto.

Otro aspecto (visible en las ecuaciones 17 y 18) es que las frecuencias están asociadas a la temperatura absoluta del medio (t_A). Por ejemplo, si consideramos el modo fundamental para un tubo de 1,0 m de longitud efectiva, esta puede tomar los valores 83 Hz u 86 Hz según la temperatura del aire sea 0°C o 20°C, respectivamente. Esa diferencia es relevante cuando se tiene que afinar un instrumento a una escala musical determinada. Una forma de resolver el problema es generar tubos cuya longitud pueda ajustarse de forma que el mismo pueda “afinarse” de la forma requerida.

Un último aspecto que queremos mencionar refiere a las conclusiones de Echegorri (2019) en relación al efecto dispersivo que se observó en columnas de aire en el interior de tubos, asociado a “pérdidas viscosas y térmicas” que usualmente no consideramos en una primera aproximación. En el trabajo se muestran velocidades de fase medidas experimentalmente para algunas frecuencias, y complementariamente su ajuste a un modelo teórico que considera los efectos mencionados.

Vibraciones transversales de una barra

Supongamos que disponemos de una barra de largo L (sobre el eje x), ancho b (sobre el eje z), espesor a (sobre el eje y), tal que $L \gg a$, y sección transversal S con simetría bilateral (Kinsler, 1995). La *coordenada* x mide la posición a lo largo de la misma, y la *coordenada* y su deformación en relación a su configuración normal (no flexada).

Luego de aplicar la mecánica de Newton a un elemento de la barra sometido tanto a momentos de flexión como a tensiones cortantes, se obtiene una aproximación a una ecuación en derivadas parciales que gobierna las ondas transversales en la misma:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = - \kappa^2 c^2 \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} \quad (\text{ec.19})$$

siendo $c = \sqrt{Y/\rho}$ en la que, Y representa al módulo de elasticidad o de Young, y ρ la densidad del material. La constante κ es el radio de giro del área de sección transversal S . Este último tiene un valor $t/\sqrt{12}$ para una barra de sección transversal de forma rectangular, siendo t su espesor medido en la *dirección* y ; si la sección transversal es circular de radio a , $\kappa = a/2$.

Una diferencia significativa entre esta ecuación diferencial y la que describe ondas en una cuerda, es la presencia de una derivada parcial de cuarto orden en relación a x , cuando en aquella aparecía una de segundo orden. Esta diferencia tiene la consecuencia de que las funciones de la forma $f(ct - x)$ no son soluciones de esta ecuación diferencial. Las ondas transversales de diferentes frecuencias no viajan por este medio con la misma velocidad y forma invariable en el tiempo. Del análisis de las soluciones de la ecuación se concluye que cada componente de frecuencia de la onda compleja viaja a su propia velocidad v . En síntesis, una barra vibrante es un *medio dispersivo* para ondas transversales.

Dado que instrumentos o partes de instrumentos musicales (diapasones, xilófonos, vibráfonos, entre otros) pueden modelarse como barras o conjuntos de ellas, estamos interesados en las frecuencias permitidas para la oscilación de una barra cuando se le imponen ciertas condiciones de frontera en sus extremos; estas vienen de a pares, y están asociadas a la naturaleza del soporte de los mismos. Explicitamos a continuación dos situaciones: *extremo prensado* (tanto el desplazamiento y como la pendiente deben ser cero en todo instante), y *extremo libre* (no puede haber un par de torsión ni una fuerza cortante).

Barra prensada en un extremo

Asumamos que una barra de largo L está rígidamente prensada en $x = 0$ y libre en $x = L$. Aplicando las condiciones de frontera que corresponden al caso, se obtienen las frecuencias permitidas para las vibraciones transversales de una barra “prensada-libre”:

$$f = \frac{\pi c \kappa}{8L^2} (1.194^2, 2.988^2, 5^2, 7^2, \dots) \quad (\text{ec.20})$$

Una primera observación es que *los sobretonos no son armónicos del fundamental*, es decir las frecuencias de los modos superiores no son múltiplos enteros de la frecuencia del modo fundamental.

La forma de la barra $[y(x)]$ para los primeros modos, expresada de forma analítica puede consultarse en Franco García (2016).

Si se golpea una barra como esta, es posible que los sobretonos tengan una amplitud apreciable en los instantes inmediatos posteriores al golpe. Típicamente los sobretonos se amortiguan rápido de forma que el sonido se convierte en una buena aproximación a un tono puro asociado a la frecuencia fundamental.

Complementariamente, la distribución de puntos nodales de una barra “prensada-libre” no corresponde a igual separación entre ellos como en el caso de una cuerda vibrante. La figura 1.9 (izquierda) muestra esquemáticamente esa separación, en la que los *nodos* se indican con “N”.

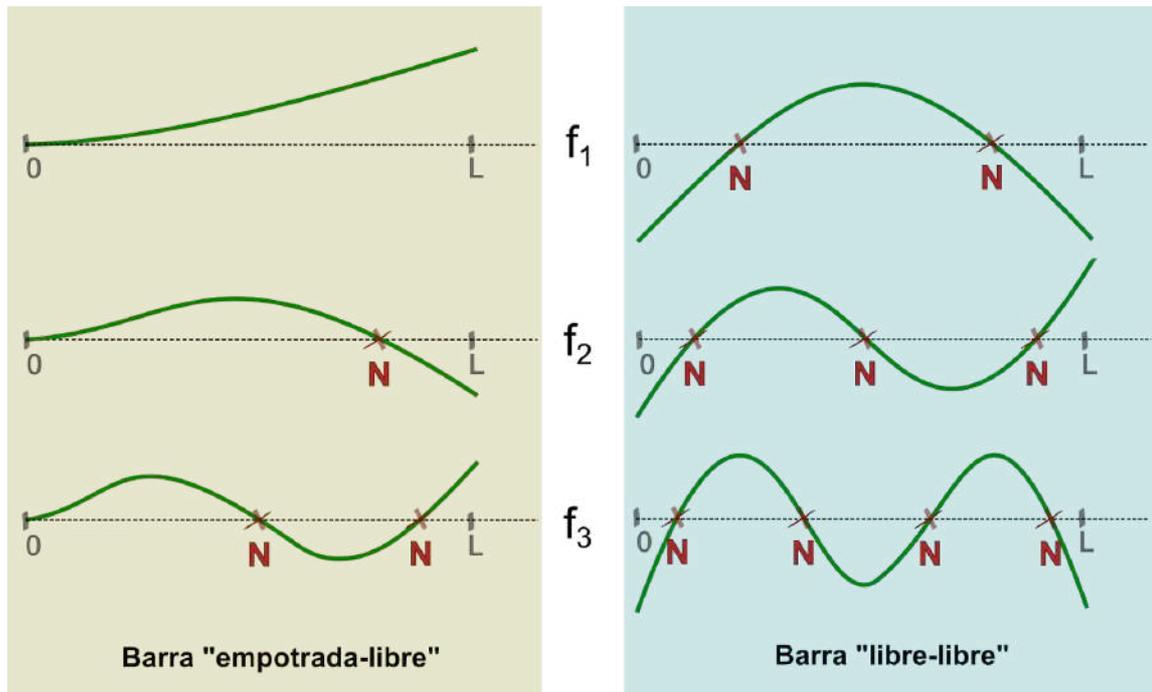


Figura 1.9. Modos transversales de vibración de una barra “prensada-libre” (izquierda) y “libre-libre” (derecha).

Barra libre en ambos extremos

Tomemos el caso de las vibraciones transversales de una barra libre en ambos extremos. En este modelo no puede haber ni fuerza cortante ni un par de torsión externo a una distancia infinitesimal de cada extremo. Sin embargo, el desplazamiento transversal y la pendiente en cada extremo no están restringidos, salvo por la condición general de validez que implica que sean “pequeños”. Estas condiciones de frontera son aplicadas a la ecuación 19 y pueden formalizarse:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0 \quad \text{y} \quad \frac{\partial^3 y}{\partial t^3} = 0$$

La imposición de estas condiciones de frontera, terminan devolviendo un conjunto discreto de frecuencias permitidas (Kinsler et al., 1995):

$$f = \frac{\pi c_k}{8L^2} (3.0112^2, 5^2, 7^2, 9^2, \dots) \quad (\text{ec.21})$$

que muestran también ser *sobretonos no armónicos* del modo fundamental.

En la tabla 1.1 se muestran las frecuencias, la velocidad de fase, la longitud de onda y las posiciones nodales para las vibraciones transversales de una barra “libre-libre” de 1,00 m de longitud. La figura 1.9 (derecha) muestra una representación pictórica esquemática de cada uno de ellos, y se indica la ubicación de los nodos (N). Como se observa, las posiciones nodales están simétricamente distribuidas en relación al centro en todos los casos.

Si se quiere soportar una barra de forma que no interfiera con un modo particular, se lo debe hacer apoyándola en la posición de los nodos utilizando un “filo” o “navaja” que habilite los cambios de pendiente que se dan en cada uno de ellos. A modo de ejemplo, si se soporta una barra en las posiciones de los nodos del modo fundamental, el resultado

será que no interferirá con el desarrollo de esa vibración, pero lo hará con los restantes modos, ya que sus nodos no están localizados en esas posiciones. Este diseño se usa en las barras de xilófonos, marimbas, vibráfonos, etc. de forma tal que los modos superiores se amortiguan rápidamente, persistiendo el tono de la fundamental.

Frecuencia	Velocidad de fase	Longitud de onda (m)	Posiciones nodales medidas desde el extremo $x=0\text{m}$ (m)
f_1	v_1	1,330	0,224; 0,776
$2,756*f_1$	$1,66*v_1$	0,800	0,132; 0,500; 0,868
$5,404*f_1$	$2,32*v_1$	0,572	0,073; 0,277; 0,500; 0,723; 0,927

Tabla 1.1. Frecuencia, velocidad de fase, longitud de onda y posiciones nodales para los primeros tres modos transversales de una barra libre en ambos extremos de 1,0 m de longitud (Kinsler et al., 1995).

La teoría de una barra libre en ambos extremos puede ayudarnos a caracterizar cualitativamente el comportamiento de los diapasones.

El diapasón: un artefacto para afinar instrumentos.

Se trata de un objeto fabricado en base a una barra metálica de sección circular o rectangular a la cual se suelda un vástago en su punto medio y se la curva hasta adoptar forma de “U” (horquilla de dos puntas). Se muestra una imagen de un diapasón típico en nuestro medio en la figura 1.10 (a). Emite (bajo ciertas condiciones de excitación) un sonido puro de frecuencia única de gran duración (usualmente con valores de Q de 1000 y superiores). Fue inventado en 1711 por el músico británico John Shore (trompetista de Haendel) para ser utilizado como referencia para afinar instrumentos musicales; Posteriormente su uso se extendió a la medicina, el estudio de oscilaciones en general, la electrónica, etc.

Su funcionamiento, en primera aproximación, puede explicarse en base a los modos normales de oscilación transversal de una barra con ambos extremos libres. Debemos imaginar que a la misma se le añade en el punto medio un vástago corto para luego doblar sus extremos (que llamaremos *ramas*) hasta que queden paralelos. Al sostener el objeto por el vástago y golpear con un martillo perpendicularmente una de sus ramas en el plano del cuerpo del diapasón se identifican los primeros modos escuchándose inicialmente un sonido que podríamos llamar “metálico” lo cual es sinónimo de que presenta gran cantidad de sobretonos de frecuencias altas (el segundo parcial tiene una frecuencia de $6,27f_1$ y emite el llamado “tono de clang” muy por encima del fundamental); Rápidamente los parciales superiores se amortiguan dejando una vibración pura sinusoidal (ya que permanece solamente el modo fundamental) escuchándose ahora un sonido que usualmente se define como “dulce” y es sinónimo de aquellos con frecuencia fundamental casi sin presencia de sobretonos. En esas condiciones las ramas oscilan en sentidos contrarios y la base con su vástago (ya que éste se encuentra en el centro de la zona antinodal media) oscilan en la dirección paralela a ellas existiendo solamente dos nodos ubicados sobre cada una de las mismas.

Una representación animada de algunos modos de oscilación de un diapasón, en la que se aprecia en primer lugar el modo fundamental puede consultarse en el sitio web *Acoustics and Vibration Animations* (Russell, 2013).

En la figura 1.10 (b) se muestra esquemáticamente (y de manera exagerada) la vibración de un diapasón en su modo fundamental. Al comparar esta figura con el modo fundamental de la barra “libre-libre” representada en la figura 1.9 (derecha, arriba) puede apreciarse (apenas en forma cualitativa) que los nodos (N en la figura antes citada) están más juntos en el diapasón que en la barra debido a la curvatura en forma de “U” y al efecto de la masa del vástago adicionada al centro de la misma.

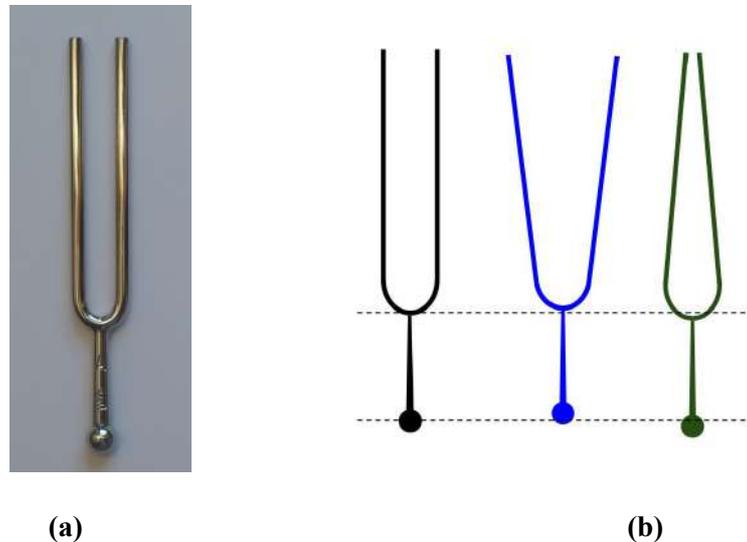


Figura 1.10. (a) Imagen de un diapasón. (b) Esquema de vibración de un diapasón oscilando en su modo fundamental.

El diapasón no puede emitir un sonido intenso ya que no es capaz de poner en oscilación gran cantidad de aire. Para lograr este objetivo se apoya el vástago sobre un objeto que acopla en forma más eficiente las vibraciones del diapasón con el aire circundante: una caja de resonancia. Si la construimos en forma adecuada se obtendrá una respuesta máxima. Esto se debe al fenómeno conocido como *ajuste de impedancia acústica* y no se trata (estrictamente hablando) de una *amplificación* ya que el aumento de respuesta no se produce por una inyección de potencia.

La frecuencia utilizada a lo largo de la historia como referencia o patrón para la afinación de los instrumentos musicales es muy vasta e interesante: evolucionó desde la inexistencia de un acuerdo internacional hasta la fijación de uno que periódicamente se discute.

En comercios de venta de instrumentos musicales de plaza y en los laboratorios de física de enseñanza media generalmente se encuentran diapasones de frecuencia 440 Hz, que corresponden a la nota llamada A4, o $1a_4$, el “1a” central de un piano, la que debe emitir la cuerda primera de una guitarra cuando se la pulsa presionada en el 5° espacio. Para las observaciones y experimentos iniciales sobre oscilaciones y acústica musical necesitaremos dos de ellos con sus cajas de resonancia y *jinetes*, piezas que pueden ajustarse sobre sus ramas para obtener frecuencias menores a la de fábrica ya que agregan masa al sistema.

La frecuencia que emite un diapasón depende del material que lo compone (caracterizado por su elasticidad y densidad), de las dimensiones y de la temperatura (ya que ésta afecta las características del material)²⁴.

Modos de una placa

La placa de la guitarra que está unida a la cuerda a través del puente es también un objeto elástico que vibra. Está relativamente fija en su borde pero tiene una cierta elasticidad en su parte central, que es donde está el puente y la cuerda que le transmite su vibración. Al igual que la cuerda con bordes fijos, una placa con borde fijo también tiene un conjunto de modos normales de vibración con determinadas frecuencias. Estos modos y sus frecuencias dependen del material de la placa y su forma, siendo usualmente muy difíciles de calcular, como en el caso de la placa de una guitarra acústica. Es importante saber que el sonido emitido por el instrumento se debe fundamentalmente a la vibración de las placas que conforman su caja, porque mueven mucho más volumen de aire del que puede mover una cuerda. Entonces es de suponer que al pulsar una cuerda, el sonido escuchado no sea solamente el correspondiente a las frecuencias de vibración de la misma, ya estudiadas. Esperamos escuchar también frecuencias correspondientes a las placas vibrantes de la caja del instrumento, así como del volumen de aire contenido. (Núñez, 2015)

Apunte sobre modos normales en placa

Uno de los descubrimientos más impresionantes de Leonardo da Vinci en el campo de la acústica fue la observación de modos normales de oscilación en placas, visualizando líneas nodales materializadas por la acumulación de briznas secas, polvo o arena fina. Esta observación, de 1787 que se le atribuye al físico alemán Ernst Chladni y se le conoce como “figuras de Chladni”, según Capra (2008) habría sido observada 300 años antes por el genio italiano.

Galileo habría hecho la observación en 1638: "Mientras raspaba una placa de latón con un cincel de hierro afilado para quitarle algunas manchas y pasaba el cincel bastante rápido sobre ella, una o dos veces, durante muchos golpes, escuché que la placa emitía un silbido agudo; mirando más de cerca a la placa, noté una larga fila de rayas delgadas paralelas y equidistantes entre sí". También Robert Hooke realizó experimentos pioneros sobre el fenómeno en 1680 (Chladni, Wikipedia, 2022).

Vibraciones de placas delgadas

Consideremos una placa rectangular delgada de sección uniforme, en la que su densidad volumétrica de masa es ρ , y tenga dimensiones a , b , y espesor $d \ll a$, b , como muestra la figura 1.11. El material tiene un módulo de Young Y y una razón de Poisson σ . Definimos un sistema de coordenadas $(0, x, y, z)$, que permita describir las ondas transversales en la placa, con soluciones de la forma $z(x, y, t)$.

²⁴ Una nota curiosa: sobre mediados de siglo XX se inventó el *piano Rhodes* un instrumento musical en el cual cada nota se producía al golpear un diapasón asimétrico. Tenía entre sus ventajas el ocupar poco espacio y no necesitar de afinación.

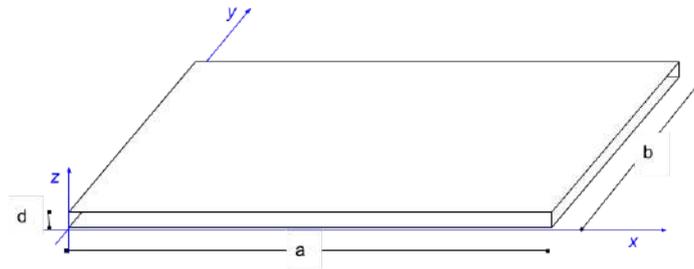


Figura 1.11. Placa rectangular delgada de espesor d y dimensiones a x b .

Para esta idealización se propone (Kinsler et al., 1995, 134; Núñez, 2015), para una placa de espesor uniforme d , la ecuación:

$$\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = - \frac{Yd^2}{12\rho(1-\sigma^2)} \nabla^2 (\nabla^2 z)$$

donde:

$$\nabla^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$$

Se proponen soluciones de la forma:

$$z(x, y, t) = \Psi(x, y) \exp(j\omega t)$$

Si se imponen las condiciones de borde a los cuatro bordes fijos y empotrados, lo que requiere la anulación de la función y de la derivada normal a cada borde, respectivamente, se obtienen las frecuencias que le corresponden a los modos normales:

$$f_{m,n} = \frac{\pi d}{16} \sqrt{\frac{Y}{3\rho(1-\sigma^2)}} \left[\left(\frac{2m+1}{a} \right)^2 + \left(\frac{2n+1}{b} \right)^2 \right] \quad m, n = 1, 2, 3, \dots \quad (\text{ec.22})$$

Las frecuencias dependen de dos sucesiones de naturales dado que el sistema vibrante es bidimensional.

En la figura 1.12 se muestran representaciones esquemáticas de los primeros modos normales para una placa rectangular. Se ha intentado representar las deformaciones por encima del plano del dibujo y por debajo del mismo de una forma cromática.

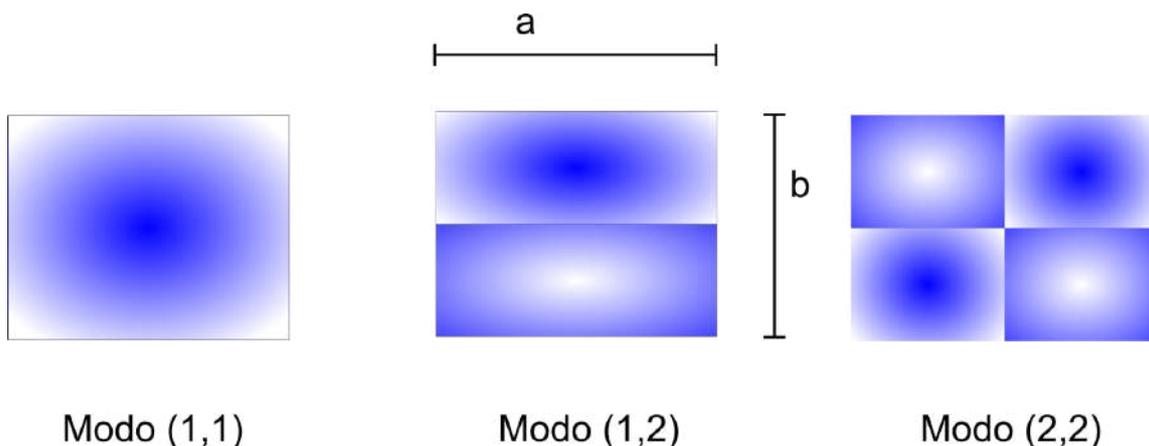


Figura 1.12. Primeros modos normales de una placa delgada rectangular según Núñez (2015).

Placas con bordes libres

Es posible implementar condiciones de borde sobre una placa de forma que sus aristas estén libres. Una de las formas cualitativas de analizar estas situaciones son las *figuras* o *Patrones de Chladni* ya mencionadas. Como es sabido, si se coloca material granular sobre una placa que se somete a vibraciones de frecuencia ajustable, se obtienen ciertas configuraciones estables para algunas frecuencias en las que el material granulado se acumula en las zonas en las que se definen nodos de vibración.

Las imágenes de la figura 1.13 fueron obtenidas por Trinidad (2018) y muestran placas cuadradas (vista superior) sobre las que se ha espolvoreado arena seca, fina, y tamizada. Al variar la frecuencia de una señal sinusoidal con la que se produce movimiento vertical de la placa, se observan diferentes configuraciones. En cada una de ellas la placa vibra con amplitudes importantes separadas por zonas donde notoriamente se acumula arena (zonas nodales). Los resultados de la figura corresponden a las frecuencias 109, 136, 315 y 433 Hz.

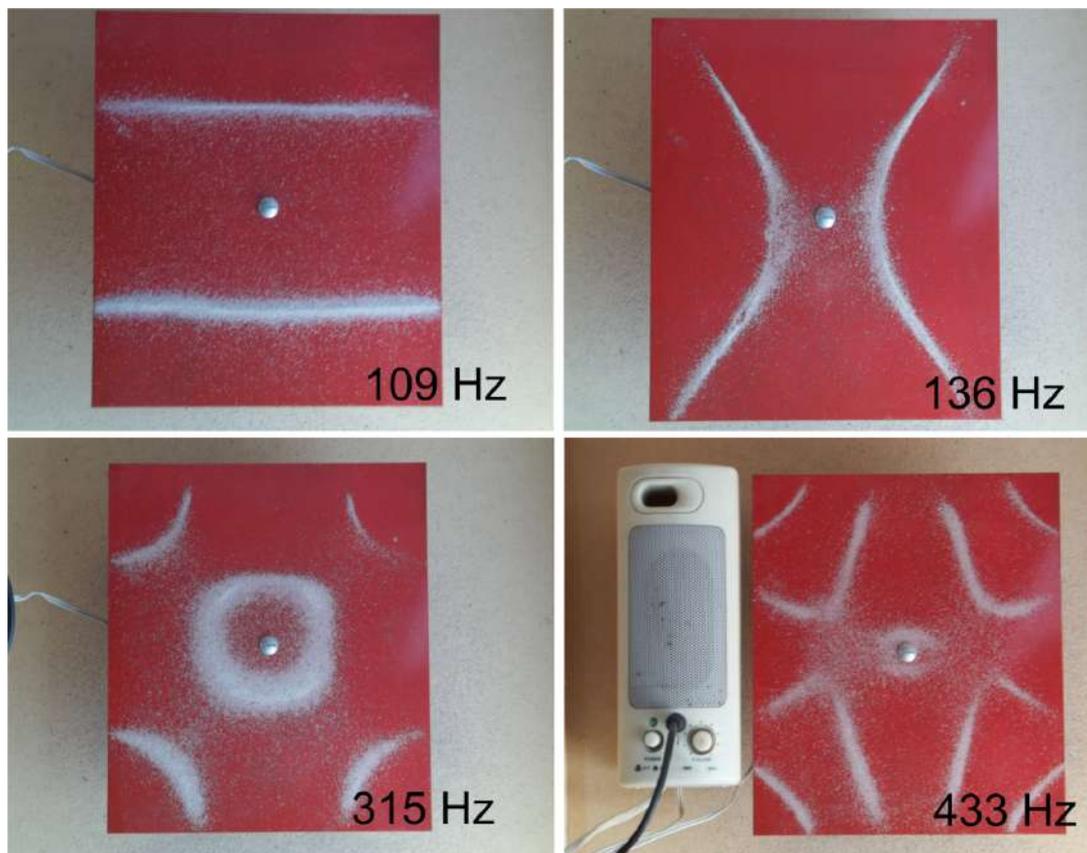


Figura 1.13. Figuras de Chladni obtenidas sobre una placa metálica cuadrada (Trinidad, 2018).

En la figura 1.14 se muestran esquemas de algunos modos de vibración para una placa rectangular. Cada representación se caracteriza por un par de enteros (m, n) como indica la ecuación 22.

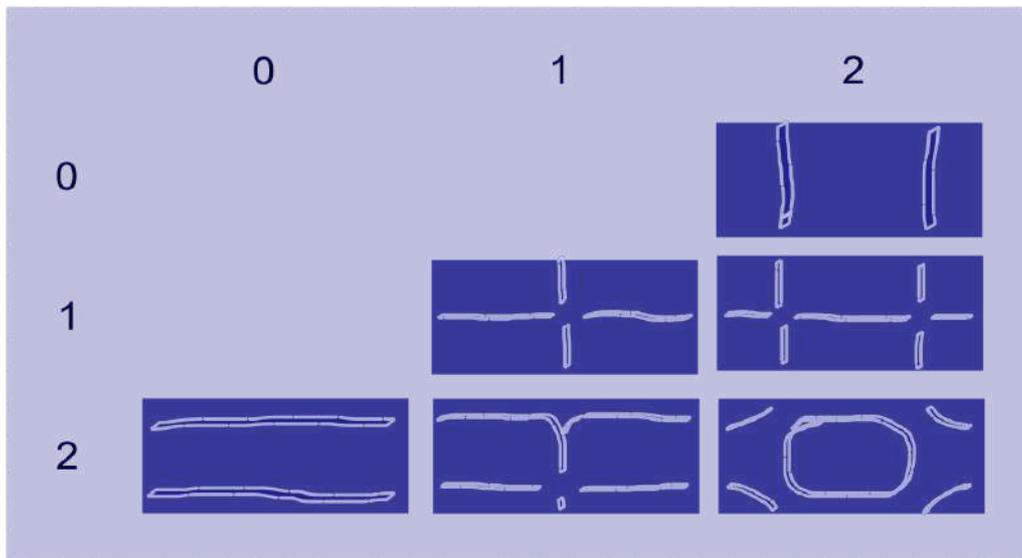


Figura 1.14. Patrones de Chladni de algunos modos de vibración en placas rectangulares. Esquemas inspirados en Fletcher & Rossing (2010).

Una forma de acercarse a la dificultad de los patrones, en especial cuando se va hacia los “modos superiores” es pensarlo entre los límites de una placa cuadrada y una barra delgada (Fletcher y Rossing, 2010).

En particular, si consideramos una barra libre en ambos extremos (como la esquematizada en la figura 1.9 derecha), vemos que para un modo n dado hay $n+1$ nodos. A medida que la barra adquiere una flexión apreciable, ocurre que la flexión a lo largo de un eje provoca una flexión en torno a un eje perpendicular. Varios modos de flexión de una placa rectangular pueden derivarse del análisis de los modos de flexión de una barra. Podría esperarse que los modos $(m, 0)$ tuvieran líneas nodales paralelas a un par de lados, y los modos $(0, n)$ líneas nodales paralelas al otro par de lados. El alejamiento en relación a esta expectativa para estos modos se debe al acoplamiento entre los movimientos de flexión en las dos direcciones perpendiculares, donde se aprecia que estas líneas se curvan y la placa adopta una forma de *paraboloide hiperbólico* (similar a la de una *silla de montar*) como en la figura 1.13 para 136 Hz (Trinidad, 2018).

Aspectos complementarios a considerar para placas reales

Usualmente consideramos para el tratamiento teórico la primera aproximación del caso de placas constituidas por materiales homogéneos, isótropos, que presentan las mismas propiedades independientemente de la dirección considerada. Sin embargo, cuando analizamos las tablas reales con las cuales se fabrican las tapas de una guitarra nos encontramos frente a un caso muy diferente. Cómo las obtenemos a partir de la sección de un tronco, tanto la densidad del material como su rigidez están determinadas por la estructura de la madera. Se puede observar que, considerando solamente dos direcciones, una paralela al eje del árbol (“a favor de la veta”) y la otra perpendicular al mismo (“cortando perpendicularmente la veta”) la rigidez es notablemente diferente. Además, las irregularidades que se presentan habitualmente tanto en la distribución geométrica como en la separación de las *vetas* (secciones de los anillos de crecimiento) introducen dificultades que limitan mucho las generalizaciones y hacen particulares a cada una de las piezas analizadas.

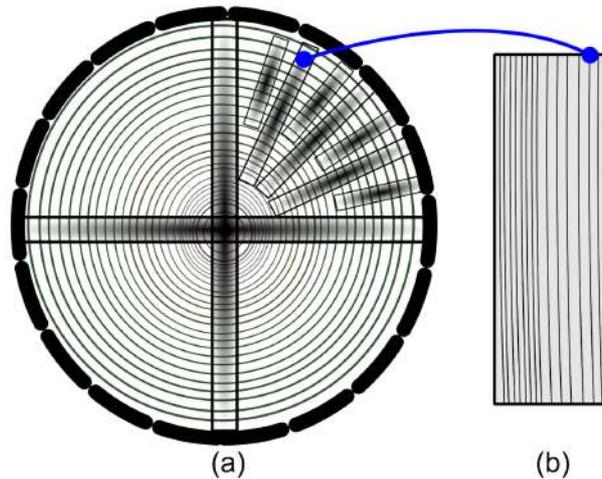


Figura 1.15. Corte radial de un tronco. (a) En la vista de una sección transversal del tronco se muestra, en uno de los cuatro sectores, la forma en que se realizan cortes radiales, y (b) muestra esquemática de una de las tablas obtenidas.

Es por ello que para obtener las tapas armónicas (vea la figura 1.18) se realizan los llamados *cortes radiales*: los que consisten en trozar el tronco realizando cortes longitudinales y de poco espesor que pasen por el eje del árbol. De esta forma los anillos de crecimiento quedan prácticamente perpendiculares a las caras de la tabla obtenida. Como se verá más adelante, además de lo anterior, las propiedades de la madera dependen también del nivel de humedad y del tiempo durante el cual está vibrando (efecto que se observa en el entorno de las cinco horas desde que se toca permanentemente el instrumento).

Además de lo anterior, un tema que hemos encontrado muy poco citado en los estudios de los modelos a los que tuvimos acceso es el nivel de acoplamiento de los diferentes modos de oscilación de una tapa dada (con todo su varetaje y el puente encolados, fijada a los aros y con las cuerdas colocadas y tensadas). Dicho nivel podría estar relacionado directamente con las características tímbricas de la muestra particular de la especie botánica de la madera de la tapa.

Modos de oscilación de una tapa de guitarra

Consideremos una tapa de guitarra clásica, sin el adosado del *abanico armónico*²⁵, de forma que puede oscilar con sus bordes libres. La figura 1.16 muestra esquemáticamente modos de baja frecuencia, siendo $f_1 < f_2 < f_3$ (Fletcher y Rossing, 2010). En esta situación pueden identificarse semejanzas con las placas mencionadas anteriormente con una geometría más simple. En particular, el modo que esquematiza la situación para la frecuencia f_1 muestra dos zonas nodales como se ven en los modos (0, 2) y (2, 0) de la figura 1.14. Algo análogo se puede identificar en el modo correspondiente a f_2 si se observa el modo (1,1) de la placa rectangular en la figura referida, y la representación para f_3 tiene una cercanía cualitativa con el modo (1, 2).

²⁵ En la sección siguiente precisamos una descripción de guitarra clásica enumerando sus principales componentes estructurales.

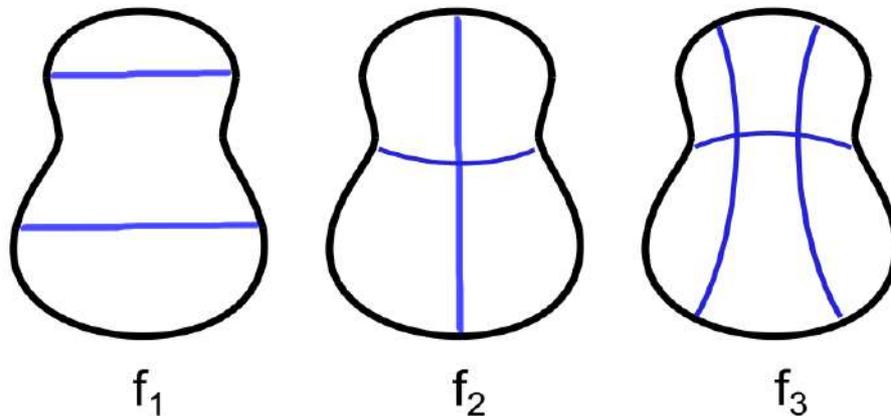


Figura 1.16. Modos de vibración de una placa de guitarra en bruto (sin el abanico armónico) con el borde libre.

Como se muestra en la sección siguiente, a la tapa “en bruto” se le fija el abanico armónico y varios componentes de refuerzo; al fondo también se fijan refuerzos. Si se repite el análisis que permite identificar los modos de estas nuevas estructuras complejas, se obtienen resultados que difieren de los mostrados en la Figura 1.16. Los modos que corresponden a las frecuencias más bajas para la tapa armónica y del fondo [se identifican usualmente con los enteros (0,0)] asociados a estas nuevas estructuras se muestran de forma esquemática en la figura 1.17.²⁶

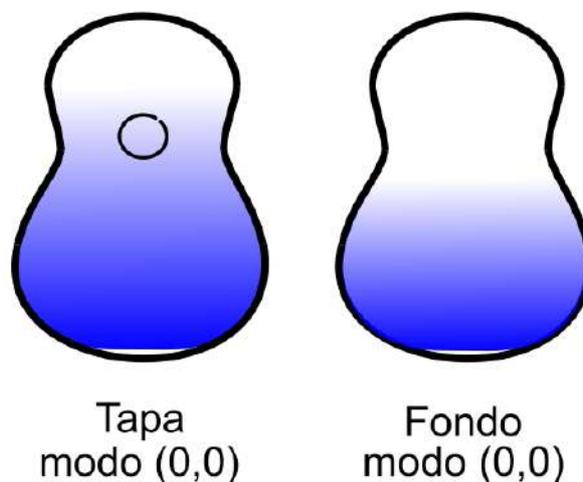


Figura 1.17. Primer modo de vibración de una tapa con el resto de la caja inmovilizada (izquierda) y primer modo del fondo con el resto de la caja inmovilizada.

²⁶ Los resultados experimentales corresponden a situaciones: cuando se analizan los modos de la tapa se inmovilizan los aros y el fondo; y cuando se analizan los del fondo se inmovilizan aros y tapa. Una caracterización que se extiende a los modos superiores puede consultarse en Fletcher y Rossing (2010).

La Guitarra clásica moderna: descripción

Este trabajo se dedica, entre otros objetivos, al instrumento musical conocido como *guitarra*, el cual existe con muy diferentes diseños desde hace algunos siglos, siendo probablemente uno de los instrumentos más famosos y populares del mundo y, en particular (por múltiples razones) de nuestro país. Específicamente nos vamos a ocupar de la *guitarra clásica*, que también se conoce con el nombre de *española*, *criolla*, *de cuerdas de nylon*, etc. Dentro de la variedad de métodos de construcción que existen vamos a tratar el *Método Español* o *Torres*. Se trata de un instrumento construido en madera que cuenta con un brazo, una caja de resonancia y seis cuerdas. En las siguientes imágenes se muestra un ejemplar y los nombres de sus partes²⁷ tanto externas como de su estructura interna clásica.



Figura 1.18. Guitarra clásica. Foto frontal con nomenclatura.

²⁷ En este punto hay que aclarar que no existe un acuerdo en la nomenclatura. El criterio que seguimos aquí fue usar principalmente la de Romanillos (2020) aunque con algún toque local.



Figura 1.19. Detalle de los extremos inferior (izq.) y superior (der.) de la caja.



Figura 1.20. Detalle de parte de la estructura interna de la caja (tapa y aros).



Figura 1.21. Detalle de la estructura interna del fondo.

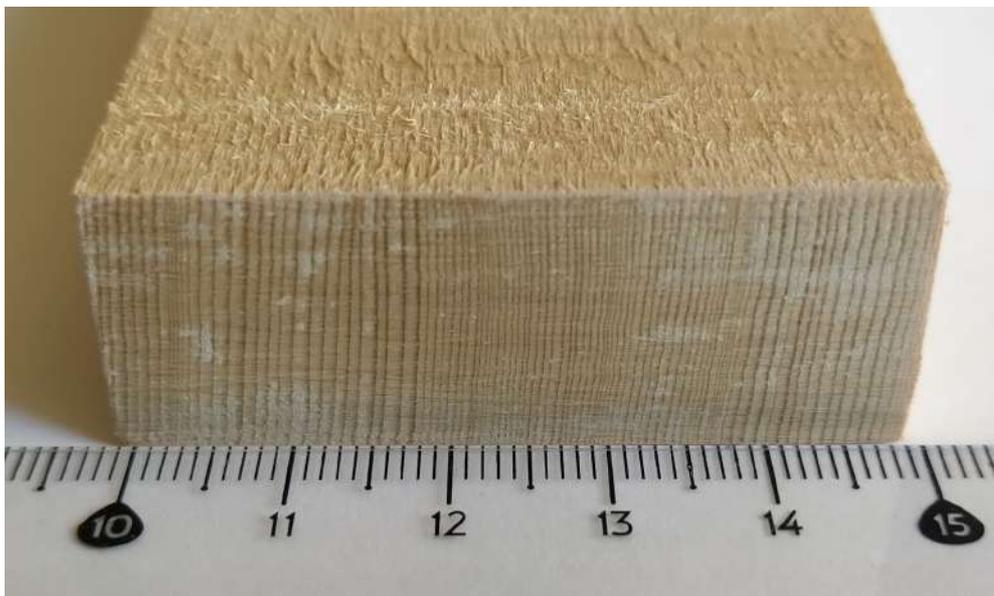


Figura 1.22. Detalle de corte radial de Sitka (*Picea sitchensis*).

Las maderas empleadas clásicamente para su montaje deben tener propiedades muy específicas de acuerdo a la función que van a desempeñar por lo cual se debe tener especial cuidado al seleccionarlas, cortarlas, almacenarlas y estacionarlas para su secado. Una de las precauciones más importantes es que se aplique un *corte radial* para obtener las

tablas y barras (para la tapa, mástil, barras armónicas y de refuerzo de fondo y varetas del abanico armónico, por ejemplo): de esta forma las vetas son paralelas entre sí y perpendiculares/paralelas a las caras de la pieza como muestra la figura 1.22.

En esta pieza puede apreciarse que el espaciado de los anillos de crecimiento no es constante ni creciente/decreciente en forma regular de un extremo al otro.

Los tipos de madera necesarios para montar el instrumento son variados. Si bien es habitual usar su nombre comercial para identificarlos esto introduce ambigüedades ya que se usan nombres iguales para maderas diferentes y a la inversa (además de que las denominaciones muchas veces dependen del país). Para salvar esta dificultad citamos a continuación (a estricto modo de ejemplo) algunas de las especies que se usan para ciertas partes de la guitarra (y para los modelos denominados *finos* o *de concierto*) junto a sus nombres comunes y botánicos (género o género y especie):

- 1) Brazo: Cedro (*Cedrela*) o Caoba (*Swietenia*)
- 2) Diapasón: Ébano (*Diospyros*)
- 3) Puente: Jacarandá de Bahía o de Río (*Dalbergia nigra*)
- 4) Tapa armónica: Pino Abeto (*Picea abies*) o Cedro rojo (*Thuja plicata*)²⁸
- 5) Caja (aros y fondo): Jacarandá de Bahía o de Río (*Dalbergia nigra*)

En término medio (y a modo de referencia general) las dimensiones rondan los siguientes valores:

- A. largo: 100 cm
- B. ancho del lóbulo mayor (o inferior) de la caja: 36 cm
- C. espesor de la caja (ancho de aros): 9 cm
- D. área de la tapa: 1200 cm²
- E. masa: 1200/1800 g²⁹

El diapasón se encuentra dividido en unos 19 a 21 *espacios* mediante el conjunto de barras metálicas incrustadas en él denominadas *trastes* (de sección en forma de "T" con la superficie vista convexa). En la guitarra clásica las bases de las cuerdas distan unos 3,5 (1ra.) y 4,5 mm (6ta.) de la cara anterior del traste 12. En la guitarra flamenca por lo general se usan los valores menores a éstos.

Las seis cuerdas están fijadas al puente y a cada uno de los pernos del clavijero apoyándose en dos piezas de hueso llamadas ceja y cejuela. La distancia estándar entre estos apoyos llamada tiro de la cuerda es de 650 mm³⁰.

Los encordados vienen para diferentes tensiones de trabajo (baja, normal, alta, etc.) siendo el valor normal del orden de los "36 Kg" (unidad usada para comunicar esta medida, unos 353 N).

²⁸ Este es un ejemplo claro de lo dicho más arriba acerca de las denominaciones: las tapas de las guitarras clásicas no son de *Abeto* ni de *Cedro* sino (básicamente) de ciertas variedades de *Picea* y de *Thuja*.

²⁹ Aquí debe aclararse que pueden seguirse dos criterios: montaje de mínimo peso o de peso mayor, lo cual define la calidad del sonido emitido. Se ampliará este tema en la sección 5.

³⁰ Estrictamente hablando el tiro se define como el doble de la distancia entre la ceja y el traste 12, punto de unión del brazo con la caja de resonancia.

Las cuerdas se identifican numerándolas del 1 al 6 desde abajo hacia arriba (con el instrumento colocado en posición de ser ejecutado). Como están sometidas prácticamente a iguales tensiones, para que oscilen a diferentes frecuencias deberán tener masas (en realidad *densidades lineales de masa*) diferentes. Las primeras tres (1a. a 3ra., que suenan más “agudas” cuando son pulsadas *al aire*, término que se refiere a la cuerda vibrando entre sus apoyos sin ser presionada en espacio entre trastes alguno) se conocen como *primas* y por lo general están fabricadas en forma de un filamento único (monofilamento) de nylon u otro material compuesto (encordados conocidos en la jerga como “de titanio”, “de carbón”, etc.) y sus diámetros³¹ son crecientes (la *tercera* es la *prima* de mayor diámetro). Las restantes (4ta. a 6ta., que suenan más “graves” cuando son pulsadas *al aire*) se conocen como *bordonas* y, por lo general, se fabrican en forma compuesta: un núcleo central de fibras de nylon rodeadas por un arrollamiento metálico (llamado *entorchado*). Sus diámetros también son crecientes (la *sexta* es la *bordona* de mayor diámetro)³².

Las notas y frecuencias fundamentales correspondientes a cada una de las cuerdas son las siguientes:

N° de cuerda	Nota	f ₁ (Hz)
1	(Mi) E ₄	329,6
2	(Si) B ₃	246,9
3	(Sol) G ₃	196,0
4	(Re) D ₃	146,8
5	(La) A ₂	110,0
6	(Mi) E ₂	82,4

Tabla 1.2. Afinación estándar de una guitarra. Se indican el número de cuerda, nombres y símbolos anglosajones para identificar la nota musical y las frecuencias fundamentales correspondientes.

El acabado (capa de protección aplicada a las maderas del instrumento) estándar para guitarras de calidad es el llamado *pulido francés* el cual consiste en la aplicación de una solución de *gomalaca* (un producto orgánico que se obtiene del insecto *Kerria lacca* conocido como cochinilla de la laca) en alcohol puro aplicada a mano mediante una *muñequilla* (estopa o algodón cubierto de un paño de tela). Se trata de un procedimiento muy delicado que consiste en la aplicación de varias decenas de capas aplicadas sucesivamente espaciadas por tiempo de secado. La tarea requiere de gran experiencia para llevarla adelante e insume mucho más tiempo que cualquier otro acabado de tipo industrial. El resultado acústico es muy superior a cualquier otro.

³¹ A esta dimensión de la cuerda se la conoce en la jerga técnica como *calibre*.

³² Como ejemplo citaremos que los diámetros de un encordado código D EJ45FF se encuentran entre los 0,61(1a.) y 1,12 mm (6ta.).

Atributos característicos de los sonidos “musicales”

“Individuos de todas las culturas concuerdan en reconocer la existencia de tres sensaciones primarias asociadas a un sonido musical dado: *altura, sonoridad y timbre*”.

Con esta afirmación contundente comienza Roederer (1997) la sección referida a los atributos que caracterizan a un sonido musical.

La propuesta de este autor consiste en correlacionar cada una de estas sensaciones con atributos físicos del sonido que provee el estímulo original a cada sensación primaria. Con este esquema descriptivo y en una primera aproximación, la sensación de *altura* está relacionada primordialmente con la *frecuencia fundamental* del sonido; la *sonoridad* con la *intensidad sonora*, descrita en términos del flujo de energía o a partir de la amplitud de presión de la onda acústica que llega al oído; el *timbre* con el *espectro*, que muestra la proporción con la cual las frecuencias de orden superior aparecen acompañando a la frecuencia fundamental.

El carácter esquemático de la descripción anterior puede vislumbrarse con ejemplos: la sonoridad de una superposición de varios sonidos no está relacionada de forma simple con el flujo de energía sonora; la correlación del timbre exclusivamente con el espectro de un sonido es al menos incompleta.

Una percepción del timbre, a un nivel que permita reconocer instrumentos musicales distintos que ejecutan la misma nota musical y con sonoridades similares, requiere de más información de la composición en frecuencias del sonido que llega a estimular el oído. Las características transientes del ataque y la caída de un tono, los *ruidos* que acompañan los mecanismos de generación del sonido en un instrumento dado como la impulsión y el golpe del macillo de fieltro que excita la cuerda de un piano por ejemplo (pero no así los ruidos vinculados al traslado de la mano izquierda sobre las bordonas en la guitarra, ya que esto se puede suprimir con la técnica adecuada de acuerdo a la *Escuela de Guitarra Carlevaro*³³ desde 1952) son igualmente importantes; cuando estas características se eliminan mediante un editor de audio, aún los expertos pueden tener dificultades para identificar el instrumento del que proviene. En una sala de concierto es posible que la composición espectral de un sonido dependa del lugar en que uno se encuentre, a pesar de lo cual es posible identificar inequívocamente el instrumento del que proviene.

Existen otros atributos subjetivos de importancia musical, como la sensación que producen dos sonidos que suenan de forma simultánea (intervalo armónico): consonancia o disonancia, que se puede asociar a lo “placentero” o “irritante” respectivamente. Ocurre que estas sensaciones no son “universales”, es decir, no son independientes de un condicionamiento cultural de un individuo. El carácter “primario” de las sensaciones *altura, sonoridad y timbre*, se define en función de esa “universalidad” y permite, no sin dificultades, tender un puente entre los sonidos musicales y la disciplina capaz de caracterizar de forma

³³ Esta *Escuela*, ya reconocida en todo el mundo, es creación del prestigioso guitarrista, compositor y pedagogo uruguayo Abel Carlevaro (1916-2001) cuya fecunda vida y obra puede consultarse en la impecable y profusamente documentada biografía escrita por su discípulo y colaborador Alfredo Escande. Acerca de esta *Escuela* escribió nuestro compositor, docente e internacionalmente destacado guitarrista Eduardo Fernández: *No se trata de un método; se trata de una meditación profunda y un análisis implacable y sistemático de todos los aspectos de la técnica guitarrística; ... Es la primera obra científica escrita en este terreno... Ese universo sonoro que es la guitarra ha encontrado por fin a su Newton que es también su Einstein. La obra de Carlevaro debe llenarnos de orgullo a todos los uruguayos.* (citado por Escande, 2005)

rigurosa las ondas acústicas que operan típicamente como estímulos al sistema auditivo que tiene al tímpano como la ventana privilegiada.

A continuación, nos referiremos a las formas usuales (y relativamente accesibles) de representar sonidos, que se basan en mostrar su evolución temporal (o de sus parciales), y en determinar la composición en frecuencias (sustentado en el análisis de Fourier) y mostrarlo para el entorno de un instante de tiempo (espectro de frecuencias) o para un conjunto discreto de sucesivos instantes de tiempo (espectrograma).

Luego de ello planteamos una ampliación de las ideas que están asociadas a la noción de timbre de un sonido musical.

Representación temporal y frecuencial de un sonido

Oscilograma

Un sonido puede caracterizarse mediante la evolución en el tiempo de la *presión acústica* -medida en *Pascal* (N/m^2) en el Sistema Internacional- que llega a un micrófono o al tímpano de un oyente. El *nivel de presión sonora* (SPL, por su sigla en inglés) se obtiene en base a una definición logarítmica que requiere tomar un valor de presión de referencia. Usualmente se calcula de forma que el resultado se expresa en decibeles (dB).

Mediante el flujo de energía, asociado a una onda sonora, que atraviesa una superficie unitaria en la dirección normal se define la *intensidad sonora*: se cuantifica ese flujo (en unidad $Joule/m^2$) durante la unidad de tiempo, de forma que esta cantidad queda medida en W/m^2 .

Usualmente, se puede relacionar la *Intensidad sonora* de un sonido y una cantidad logarítmica llamada *Nivel de intensidad sonora* (IL, por sus siglas en inglés) que también puede expresarse en dB. Para casos de una onda que se propaga, en la que se puede medir un flujo de energía, los valores de SPL e IL son idénticos (Roederer, 1997).

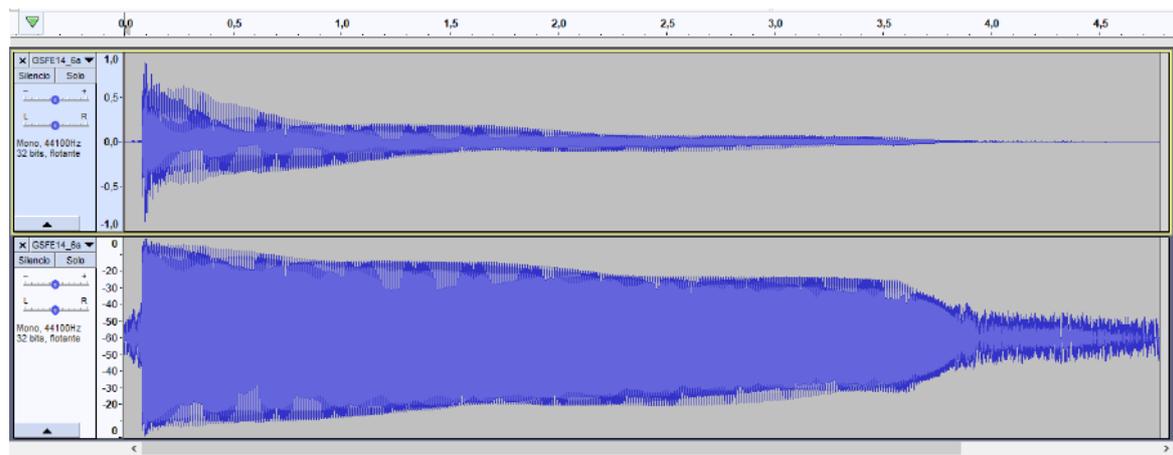


Figura 1.23. Evolución en el tiempo del sonido emitido por una guitarra al pulsar la cuerda sexta al aire. Oscilograma del sonido en escala lineal (arriba) y mediante un eje de ordenadas en decibeles (abajo) (Audacity).

En la figura 1.23 se representa la evolución en el tiempo de un sonido en la interfaz de *Audacity*³⁴. En la parte superior de la figura se indica el tiempo en unidad *segundos*. En el gráfico superior se muestran las ordenadas (eje lineal) en el que se indica la amplitud del sonido en unidades arbitrarias (asumimos que es una cantidad proporcional a la presión

³⁴ Audacity es un software multiplataforma que permite grabar, editar y analizar sonidos. Anotamos una descripción breve en la sección 4, entre otras herramientas similares.

acústica que llega al sistema de adquisición). Esta representación (o mejor una con un zoom en el eje de tiempos) se llama usualmente *Oscilograma*.

En la parte inferior de la figura se representa la misma “forma de onda”, donde la cantidad en ordenadas se muestra en decibeles (eje logarítmico). Observe que en el segundo gráfico se pueden identificar sectores en los que la envolvente³⁵ evoluciona de forma aproximadamente lineal en el tiempo, distinguiéndose al menos dos ritmos de decaimiento. La representación temporal de un sonido permite, por ejemplo, visualizar periodicidades en el tiempo cuando las hay, distinguir señales periódicas puras (una sola frecuencia) de señales complejas (forma no sinusoidal) que tiene asociadas más de una frecuencia, entre otros aspectos. En general es de interés, para el análisis de sonidos, obtener una representación en términos de frecuencias de los mismos. Esto implica identificar frecuencias, mediante técnicas de cálculo accesibles fácilmente en la actualidad, que se sustentan en el análisis de Fourier. En la sección siguiente se describen sucintamente las formas gráficas en las que pueden presentarse los resultados de una Transformada Rápida de Fourier (FFT, por su sigla en inglés) aplicada a un sonido como el que se expone en la figura 1.23.

Espectrogramas

Si se aplica un algoritmo como la FFT a un sonido en el entorno de un cierto instante de tiempo, los valores de salida son las frecuencias que están presentes en la señal original y sus respectivas amplitudes. A estos últimos típicamente se los ordena sobre una escala logarítmica. Si este algoritmo se aplica a una sucesión de instantes de tiempo en que se tiene información de la señal, el resultado es una matriz que contiene la información de los niveles sonoros que le corresponden a cada frecuencia analizada en cada uno de los instantes de tiempo en que se concretó el cálculo del algoritmo. Si se quiere representar esta información simultáneamente en forma de gráfico se necesita de un espacio tridimensional. Esta representación tridimensional se llama usualmente *Espectrograma*.

Formatos de los espectrogramas

A grandes rasgos, encontramos dos formatos en los cuales se muestra esta información de manera simultánea. Un formato “plano”: en el eje de abscisas se ubica el tiempo y en el de ordenadas las frecuencias en el rango de interés. El nivel sonoro se codifica mediante el “brillo” de cada píxel, o mediante el “color” de los mismos en escalas en las que se correlacionan colores con intervalos de valores de nivel sonoro.

³⁵ Se caracteriza en la siguiente subsección.

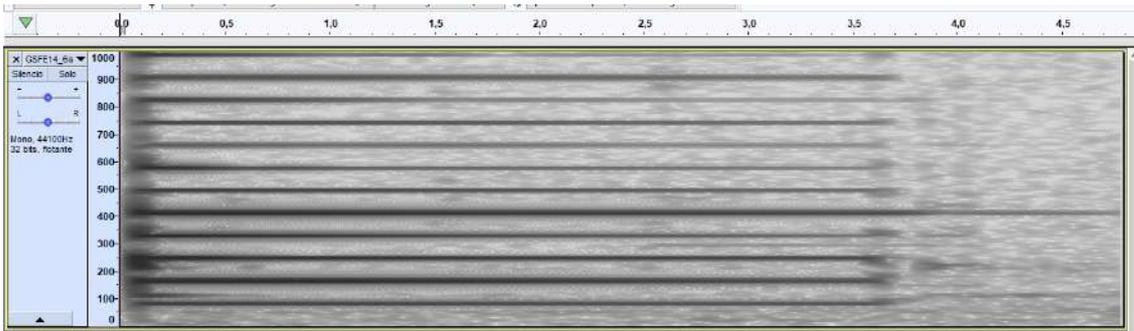


Figura 1.24. Espectrograma de sonido para un rango de frecuencias de 0 a 1 kHz (Audacity).

En la figura 1.24 se ve un espectrograma del sonido (cuya representación temporal se mostró arriba) para un rango de frecuencias definido entre 0 y 1 kHz, obtenido con Audacity.

Un segundo formato para representar la información referida hace uso de la perspectiva, de forma que el espectrograma se visualiza en tres ejes a la vista. El que mostramos en la figura 1.25 fue obtenido mediante software diseñado especialmente para analizar sonidos: *Espectrograma de audio* (Núñez, 2022) y muestra el nivel sonoro en función de la altura en el eje “dB” y al mismo tiempo mediante una codificación cromática cuya referencia se ubica a la derecha del gráfico. Esta representación tridimensional se llama también *Objeto sonoro* (Gerard, 2011).

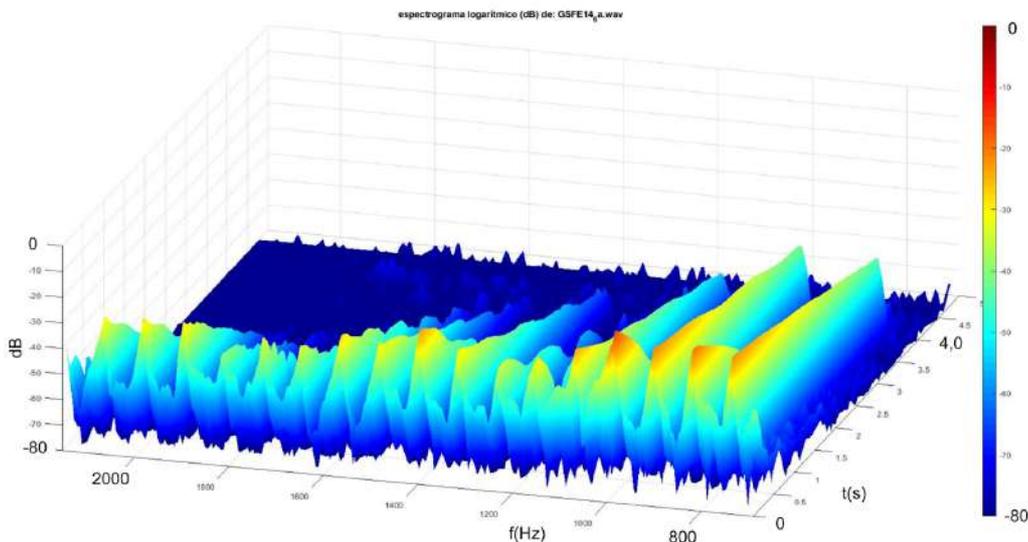
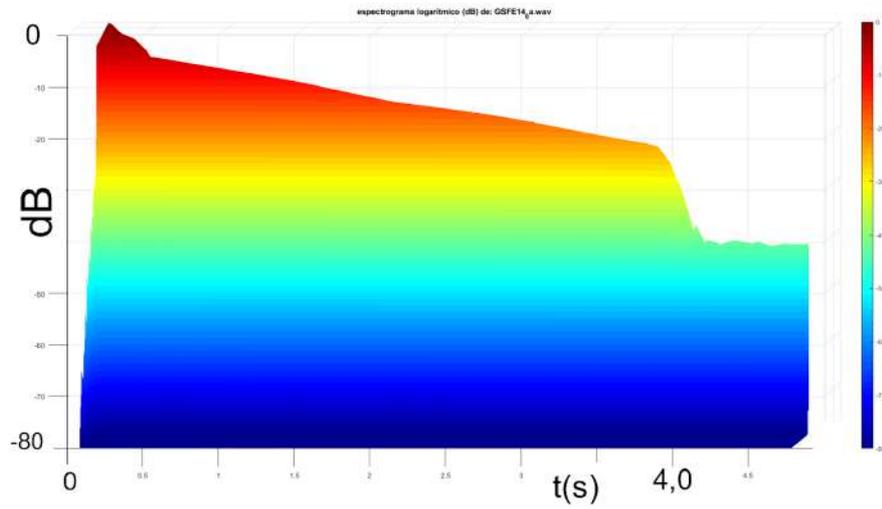
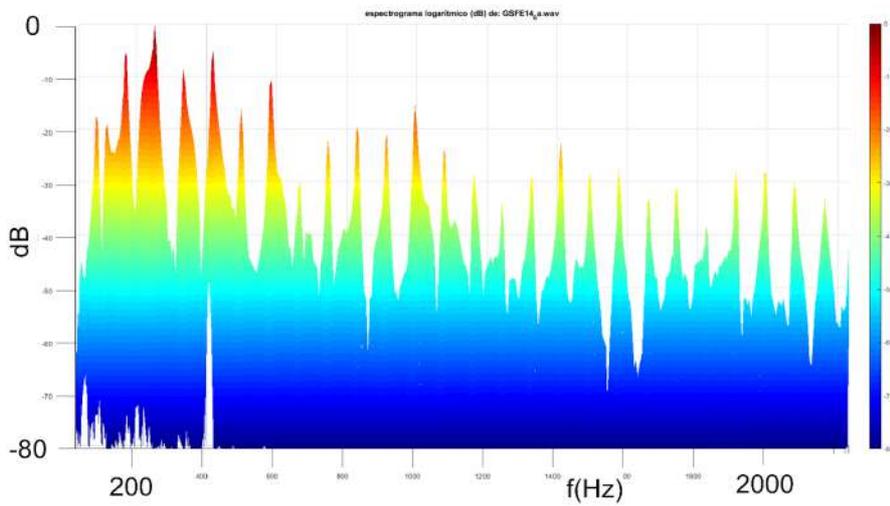


Figura 1.25. Espectrograma de audio (Núñez, 2022).

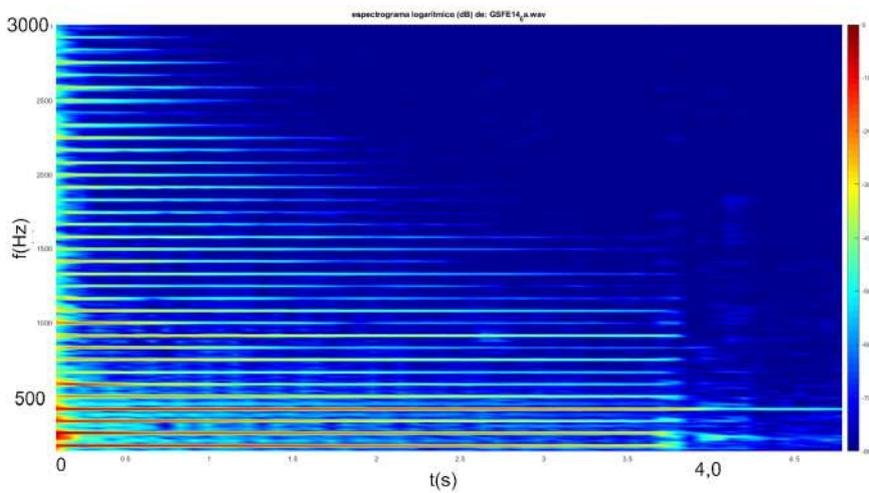
Una representación tridimensional muestra la totalidad del objeto a analizar. En ocasiones puede ser más práctico disponer de la información en un plano en el que se representan dos coordenadas por vez. De esta forma se puede visualizar un *plano dinámico* (Nivel sonoro en función del tiempo), o un *plano armónico o espectral* (Nivel sonoro en función de la frecuencia), o un *plano melódico* (Frecuencia en función del tiempo). Se muestran estos planos en la figura 1.26, para el sonido que se representó en la figura 1.23.



(a) Plano Dinámico.



(b) Plano armónico.



(c) Plano melódico.

Figura 1.26. Representando sonidos en planos dinámico (a), armónico (b), y melódico (c)

Altura de sonidos “musicales”

“La Europa del siglo XVIII establecía una neta discriminación -naturalmente arbitraria- entre los sonidos que eran «musicales» y los otros, los que calificaba como «ruido». Esta discriminación surgía de la sistematización racional del repertorio de materiales de la música de allí y de entonces, y es válida sólo en función de esa música. ... Hay pueblos que no poseen instrumentos de cuerda o cordófonos: para ellos, sólo son «musicales» los sonidos vocales, los producidos por instrumentos de soplo o aerófonos, y los de los tambores, sonajas y otros que la academia europea llama «de percusión». Si estos pueblos dieran en lucubrar (sic) teorías arbitrarias, dirían que un violín es un artefacto productor de «ruidos» y no de «sonidos musicales».” (Aharonián, 2002).

La cita anterior presenta una postura en la que se propone no usar la etiqueta “musicales” aplicada a sonidos, al menos en el sentido extendido a partir de esa mirada europea occidental en el siglo de la Ilustración.

En la sección anterior tomamos la mirada de Roederer, en la que una de las sensaciones primarias asociables a sonidos “musicales” es la altura; en forma cualitativa asociada al carácter grave o agudo del sonido. Uno de los aspectos que no trata este trabajo es lo que en Psicoacústica se llama *percepción de altura de un sonido*. Numerosos experimentos muestran la dificultad del asunto cuando se pretende entender el proceso al hacer sonar dos sonidos de alturas diferentes de forma simultánea, cuando se puede asociar una altura a un sonido complejo al que se le extrajo la frecuencia fundamental, entre otros³⁶.

A pesar de lo anterior, bajo ciertas circunstancias es posible que personas con un entrenamiento básico puedan, por ejemplo, distinguir entre las alturas del sonido que una guitarra emite al pulsar la cuerda sexta “al aire” del que radia luego de pulsar la cuerda prima “al aire”. Es altamente probable que la mayoría de las personas que escuchen ambos sonidos afirmen que el segundo sonido es más agudo que el primero.

No siempre es posible asignar con claridad una altura a un sonido en un contexto musical. Una de las causas posibles es el carácter no periódico de un sonido. Veamos un contraejemplo: el sonido que se representa en la figura 1.26 (plano melódico) muestra un conjunto de frecuencias presentes que (al menos a primera vista) están equiespaciadas. En este tipo de sonidos complejos en los cuales los parciales superiores tienen asociadas frecuencias que son múltiplos enteros de la más baja (armónicos) es altamente probable que podamos asociarles una altura: es el ejemplo más notorio de *sonido con altura definida*. Mencionamos antes que las cuerdas y las columnas de aire muestran un espectro que tiene características generales como las definidas en el contraejemplo, en primera aproximación (cuando no se aprecian efectos de inarmonicidad, por ejemplo).

Una membrana, como el parche de un tambor, puede oscilar en un conjunto de modos normales cuyas frecuencias no forman una serie armónica: no son múltiplos enteros de la menor de ellas. Por tanto, el sonido que emite esta familia de cuerpos vibrantes no tiene una composición en frecuencia como muestra el ejemplo de la figura 1.26 c. Esta característica no periódica lleva a que no se puede definir una altura a estos sonidos (Aharonián, 2002).

³⁶ Una mirada panorámica sobre la percepción de altura en tonos puros puede consultarse en Roederer (1997).

Una aproximación a la noción de timbre de un sonido

En esta sección nos acercamos a la noción de timbre de un sonido, una cualidad compleja ya que depende de varias características físicas del sonido (Miyara, 2006). Para ejemplificar esa complejidad tomaremos sonidos emitidos por un instrumento musical: una guitarra clásica.

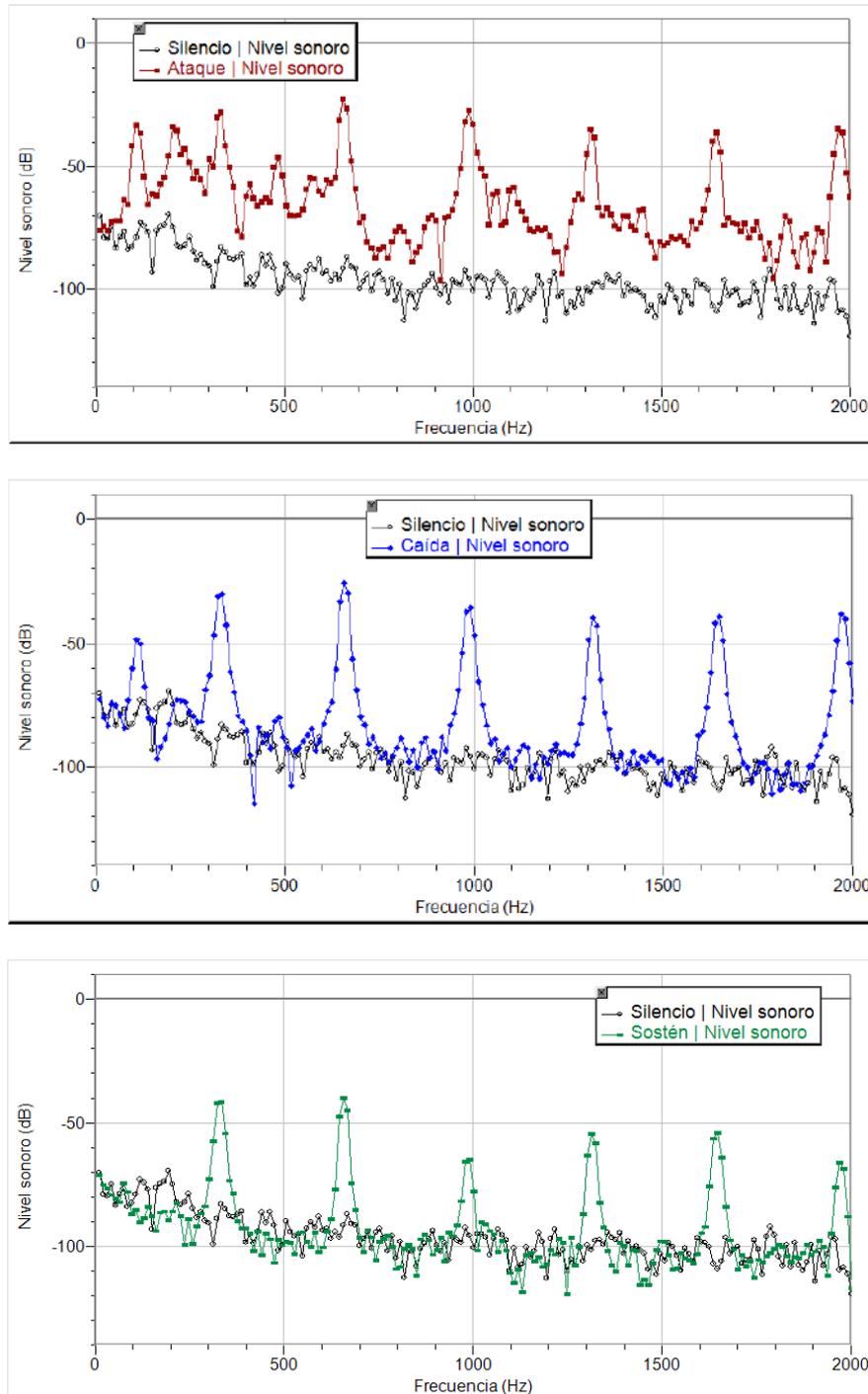


Figura 1.27. Espectro del sonido emitido por una guitarra al pulsar su primera cuerda en tres instantes de tiempo: ataque (arriba), caída (centro), sostén (abajo). Círculos huecos grises muestran el espectro del silencio previo a la emisión.

Espectro de frecuencias

Consideremos el siguiente aspecto que se origina al analizar un sonido mediante su espectro de frecuencias (plano armónico), de bandas relativamente estrechas, lo que permite tener una buena resolución en los valores de frecuencia. Se han calculado, mediante Audacity, espectros del sonido en diferentes instantes de tiempo de su evolución (Jansson, 2002). La figura 1.27 muestra el resultado para un sonido emitido por una guitarra al ser pulsada su primera cuerda “al aire” en tres situaciones que en la sección siguiente identificamos con etapas de un modelo usual, y llamaremos *ataque* (arriba), *caída* (centro) y *sostén* (abajo). Se muestra el resultado en un rango acotado de frecuencias: entre 0 Hz y 2 kHz.

A modo de ejemplo, si en la figura 1.27 contamos los picos que corresponden a niveles sonoros mayores o iguales a -50 dB encontramos 9 parciales durante el *ataque*, 7 en la *caída* 7, y 2 en el *sostén*.

Los elementos anteriores fundamentan la dificultad de explicar la correlación exclusiva entre el *espectro de frecuencias* de un sonido con el atributo *timbre*. Esto nos lleva a considerar otras características físicas del sonido que permitan completar esa caracterización.

Envoltentes

Modelado de la envolvente de un sonido

En la figura 1.28 se muestra la representación temporal de un sonido emitido por una guitarra (Audacity), donde se indica el eje temporal, en unidad *segundos*, en la parte superior. A la misma se le superpone un esquema que modela la envolvente en cuatro tramos o fases consecutivas: *ataque*, *caída*, *sostén* y *relevo*; esto se indica con la sigla ADSR, construida con los vocablos ingleses Attack-Decay-Sustain-Release (Miyara, 2006).

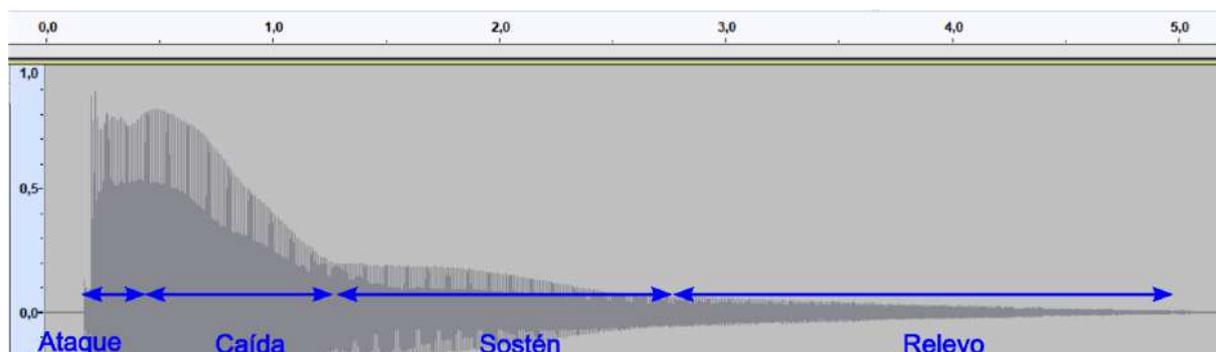


Figura 1.28. Envoltente de un sonido formado por cuatro tramos consecutivos.

Los tramos pueden definirse de forma primaria de la siguiente manera³⁷: *ataque* es el tiempo de entrada, lo que tarda el sonido en alcanzar su nivel máximo mientras es generado; *caída* es el tiempo que tarda dicho nivel máximo en reducirse al de sostén; el tiempo donde el nivel se mantiene constante³⁸ se llama *sostén*; *relevo* o *relajación* es el tiempo en que el sonido termina reduciendo su nivel hasta cero. En el ejemplo de la figura

³⁷ En base al artículo de Wikipedia: https://es.wikipedia.org/wiki/Envoltente_ac%C3%BAstico

³⁸ En los instrumentos de cuerda pulsada estrictamente no se mantiene constante la amplitud.

1.28 el ataque ocupa un intervalo no mayor a 0,1 s, la caída un intervalo cercano a 0,8 s, el sostén ocupa aproximadamente los siguientes 1,5 s, y el relevo al menos 2,3 s.

Obviamente en la estructura planteada todos los tramos son relevantes. Es decir, si se altera severamente la envolvente, por ejemplo, extrayendo el *ataque*, el sonido se vuelve prácticamente irreconocible (Miyara, 2006).

Características particulares de la envolvente del sonido de una guitarra según la dirección de pulsación (o punteo) de la cuerda.

En el caso del sonido emitido por una guitarra, su envolvente puede cambiar dependiendo de algunas variables. En la figura 1.29 mostramos los efectos que producen en ella las diferentes direcciones en las que se puede pulsar la cuerda (Jansson, 2002).

En la figura se plantean dos situaciones extremas y una intermedia. En la primera (arriba en la figura) se muestra un punteo perpendicular a la cuerda y al plano de la tapa armónica (placa superior) del instrumento, en el que se obtiene un sonido fuerte y corto. Si se pulsa la cuerda en una dirección perpendicular a la misma y paralela al plano de la tapa, se obtiene un sonido extenso en el tiempo, pero débil.

En el caso de una pulsación que tenga componentes tanto normal como paralela a la tapa (abajo en la figura) se tiene una situación intermedia en la forma que evoluciona el nivel general de sonido.

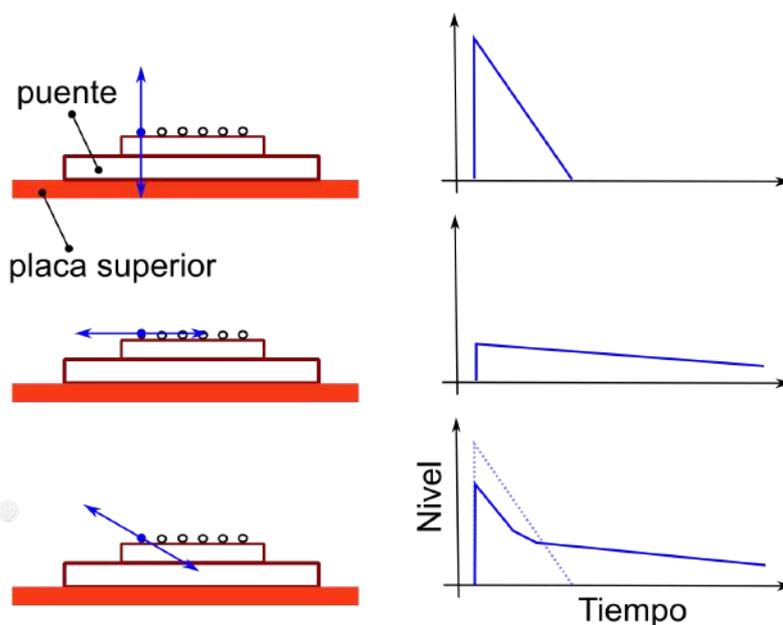


Figura 1.29. Efectos que produce la dirección en la que se pulsa la cuerda en la envolvente del sonido de una guitarra.

Las afirmaciones anteriores refieren a la envolvente que describe el comportamiento general del nivel del sonido emitido, se le llama usualmente *envolvente primaria*, y se corresponde con lo que llamamos en este trabajo plano dinámico del sonido.

Además de la envolvente primaria de un sonido puede analizarse la evolución temporal de cada uno de sus parciales (eventualmente armónicos). Estas entidades se llaman *envolventes secundarias* (Miyara, 2006).

Mostramos a continuación la evolución temporal del modo fundamental y algunos de los sobretonos del sonido tomado como ejemplo en esta sección mediante la herramienta que Núñez (2022) desarrolló especialmente para obtener *espectrogramas* de sonidos que se ingresan al sistema de cálculo mediante un archivo de audio.

En la figura 1.30 se muestra la envolvente del modo fundamental de un sonido. Se superpone a esta representación un ajuste exponencial a parte de los datos, cuya forma y resultados se pueden ver en el recuadro de la figura. Del ajuste destacamos el factor $C = (0,583 \pm 0,006) \text{ s}^{-1}$, y los valores de la correlación (0,9997) y de la desviación cuadrática media en el eje de ordenadas (3 UA).

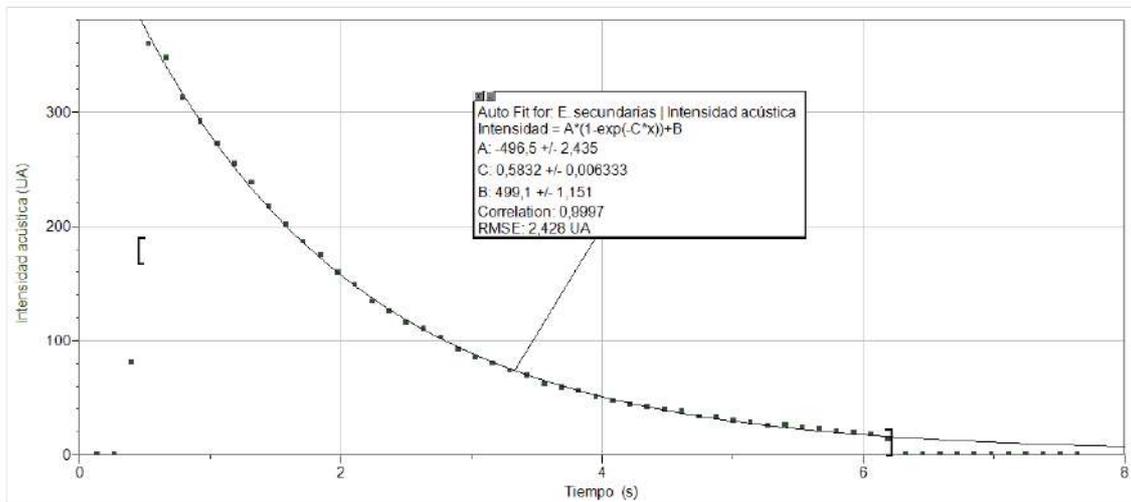


Figura 1.30. Envolvente secundaria correspondiente al modo fundamental de oscilación de la cuerda, tomado del espectrograma del sonido emitido. Se superpone un ajuste exponencial cuyos resultados se muestran en el recuadro.

En la figura 1.31 se representa la evolución temporal de los niveles de los primeros seis modos. En este caso se ha utilizado el eje de ordenadas con escala logarítmica con el objetivo de visualizar que el único modo que tiene un decaimiento exponencial es el fundamental, que en esta representación se ve como una función lineal del tiempo, con una tasa de decaimiento aproximada: $-2,4 \text{ dB/s}$. Los restantes modos representados no tienen ese aspecto, si consideramos todo el intervalo de tiempo visible en el gráfico.

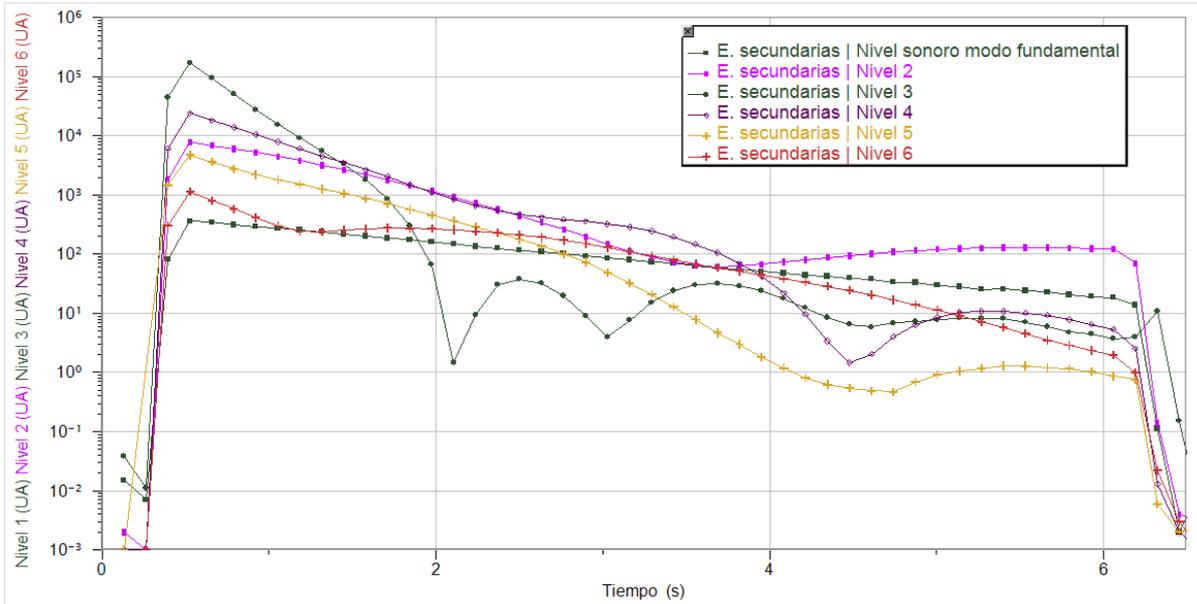


Figura 1.31. Evolución temporal del nivel sonoro de las envolventes secundarias correspondientes a los primeros seis modos de la cuerda.

Un segundo aspecto que se visualiza en el gráfico es que los modos que tienen asociados amplitudes mayores en la zona del ataque decaen más rápidamente; esto es notorio para el parcial 3 y visible para los parciales 4 y 5. Adicionalmente el parcial 3 parece “regenerarse” luego de la abrupta caída.

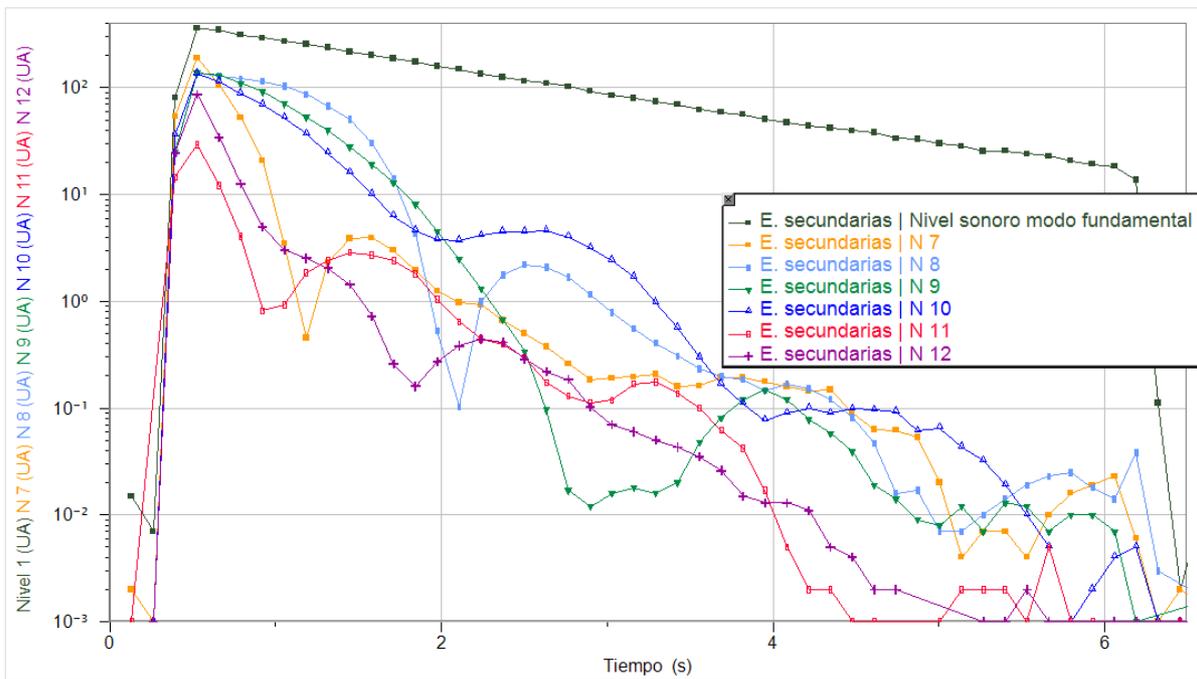


Figura 1.32. Envolventes secundarias: evolución temporal para los últimos modos analizados, con la referencia de la envolvente del modo fundamental.

En la figura 1.32 se muestra la evolución temporal de algunos modos superiores al sexto, dejando como referencia el modo fundamental. Aquí también se utiliza un eje de

ordenadas logarítmico, en donde se observa nuevamente la apariencia lineal del modo fundamental (decaimiento exponencial) a diferencia de los modos superiores relevados.

Los modos superiores (hasta una frecuencia de 1 kHz) denotan un decaimiento promedio más drástico que el modo fundamental (un promedio del conjunto da un valor cercano a los -9 dB/s).

Formantes

“El espectro sonoro de un instrumento de cuerda no es igual al de las vibraciones de las cuerdas.”

Esta afirmación (Roederer, 1997; coincidente con Leipp, 1977), destaca la idea de que conocer el espectro asociado exclusivamente a la vibración de las cuerdas es un primer paso para acercarse al sonido emitido por un instrumento como la guitarra, el violín o el piano, pero se requiere adicionalmente conocer el comportamiento del *resonador* asociado.

Las vibraciones de la cuerda se convierten en vibraciones del resonador, fundamentalmente en el extremo de la cuerda fijo al puente del instrumento, en el caso de la guitarra o el violín. A pesar que los desplazamientos en el extremo son muy pequeños, la fuerza involucrada es del orden de la tensión en la cuerda y esto trae como consecuencia que el trabajo de esta sobre el resonador sea apreciable, al punto de que hay una considerable transferencia de energía.

Para entender el problema es especialmente importante saber cómo responde un resonador al ser excitado con señales de frecuencia ajustable y amplitud fija. Una forma elemental de hacerlo es someterlo a señales puras (una sola frecuencia) y medir la respuesta, por ejemplo, cuantificando la intensidad de la onda sonora que emerge del instrumento. Si se grafica la señal de salida en función de la frecuencia de la señal excitadora sinusoidal se tiene una representación que llamamos *curva de respuesta del resonador o curva de resonancia*.³⁹

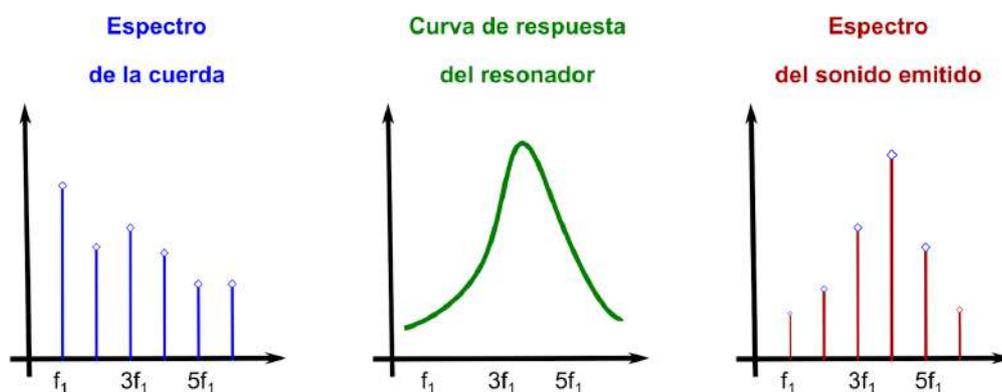


Figura 1.33. Efecto de una curva de respuesta de la caja de un instrumento sobre el espectro de la excitación original, dando como resultado el Espectro del sonido emitido.

³⁹ En el anexo de la sección *Guitarra: modelos a baja frecuencia*, presentamos una familia de *funciones de respuesta en frecuencia* típicas.

En la figura 1.33 se esquematiza el efecto de un resonador (cuerpo de una guitarra, por ejemplo) sobre el sonido emitido por el instrumento, al ser excitado en una de sus cuerdas que tienen asociados una serie de modos de oscilación (*Espectro de la cuerda*). La curva del centro de la figura representa una posible curva de respuesta de la caja del instrumento (guitarra, violín) que llamamos *curva de respuesta del resonador*. A la derecha en la figura se muestra el resultado de esta interacción en la forma del *Espectro del sonido emitido* por el instrumento.

En el ejemplo, el armónico del modo fundamental que tiene una amplitud relevante en el espectro original, termina con una amplitud relativa menor; en contrapartida el armónico cuatro se ve realzado por el efecto del resonador.

La curva de respuesta de un resonador es una característica que al menos en cierto tiempo y espacio es invariable en un instrumento dado. Supongamos que su curva de respuesta tiene una región de resonancia en torno a una frecuencia f_0 . El instrumento reforzará las frecuencias cercanas a f_0 sin importar qué nota musical esté sonando, a condición que esas frecuencias se encuentren en el espectro original de la cuerda.

Una región de resonancia ancha que refuerza los armónicos superiores en un rango fijo de frecuencias se llama *formante*. El resonador de un instrumento musical puede tener varias de estas regiones. Miyara (2006) y Roederer (1997) coinciden en que estas zonas cumplen una función importante en la *identificación* de instrumentos musicales; lo que se fundamenta en que los formantes son la única característica común a buena parte de los sonidos emitidos por un instrumento dado.

El concepto es relevante también en el campo de la fonética. En este caso, el esquema para la emisión de sonidos se constituirá por un emisor (“cuerdas” vocales) y un resonador compuesto por las diversas cavidades del conducto vocal (laringe, boca y cavidad nasal). Este enfoque ayuda a identificar la emisión de vocales del alfabeto: pueden identificarse a partir de la cuantificación de los primeros formantes en una emisión sostenida. La figura 1.34 muestra (arriba) un oscilograma de la emisión de dos vocales (“a” y “u”) por un varón adulto, que se han procesado en el software especializado Praat (Boersma y Weenink, 2021).

En la parte inferior de la figura se muestra un espectrograma respectivo de los mismos sonidos: en el eje de abscisas se muestra el tiempo, en el eje de ordenadas se muestra la frecuencia (entre 0 y 5 kHz). El nivel sonoro se codifica mediante el brillo de cada píxel, en este caso niveles altos se corresponden con niveles de brillo bajos (las zonas más oscuras indican mayor nivel sonoro). El espectrograma correspondiente a la vocal “a” muestra, en principio, cuatro zonas con nivel alto del sonido (oscuras); mientras que el correspondiente a la vocal “u” muestra una región oscura, en el rango de frecuencias mostrado. Esas zonas oscuras, de frecuencia aproximadamente constante, representan los formantes correspondientes a cada sonido. Típicamente cada uno de ellos se caracteriza por dos atributos: *una frecuencia* ($F1, F2, \dots$) que corresponde al valor de la máxima amplitud en esa zona y *un ancho de banda*⁴⁰ ($B1, B2, \dots$) que indica cómo se extiende la curva a lo largo del eje de las frecuencias: anchos de banda “grandes” se corresponden con curvas “aplanadas” y anchos de banda “pequeños” se asocian con curvas “angostas”.

⁴⁰ En este contexto, y tomando como referencia la curva en el centro de la figura 1.33, el ancho de banda se obtiene definiendo las frecuencias asociadas a amplitudes (eje de ordenadas) que están 3 dB por debajo del valor máximo. La diferencia de estas frecuencias es lo que define el ancho de banda (Park, 2002).

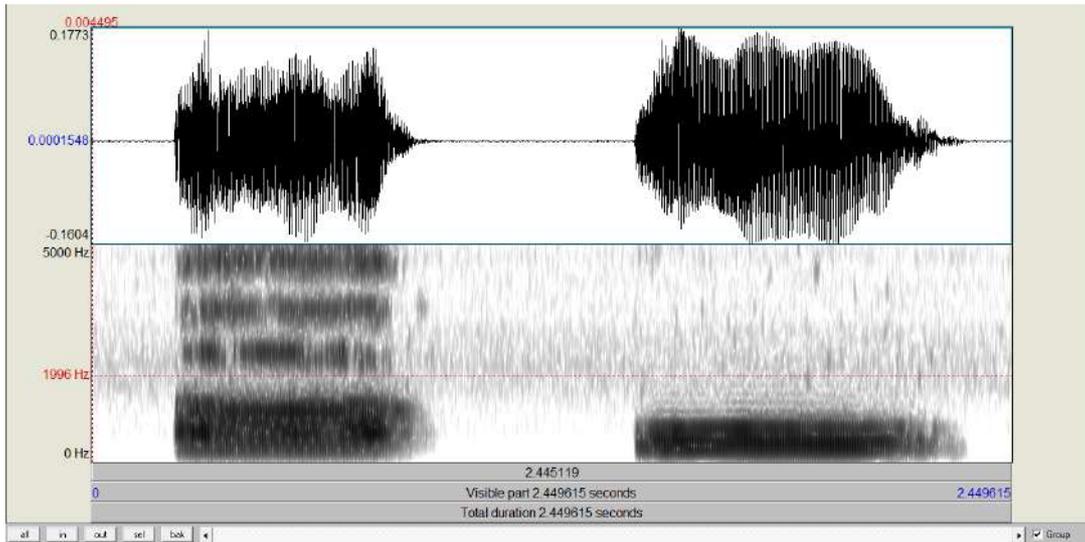


Figura 1.34. Representación de sonidos emitidos por un varón adulto al pronunciar las vocales “a” (izquierda) y “u” (derecha). En la parte superior de la figura se muestra un oscilograma de los sonidos y en la parte inferior sus correspondientes espectrogramas en el rango de 0 a 5 kHz. Se coloca una referencia en frecuencia cercana a 2 kHz (línea punteada roja).

Mostramos un segundo ejemplo en la figura 1.35. Se han grabado los sonidos emitidos por una guitarra clásica punteando (o pulsando) con púa las cuerdas 6a. (izquierda) y 5a. (derecha), ambas “al aire”. En la parte superior de la figura se muestra un oscilograma típico y en la parte inferior sus correspondientes espectrogramas. A este último se ha superpuesto un cálculo de formantes (Boersma y Weenink, 2021) que se representan mediante círculos blanquirrojos ($F1$, correspondiente al primer formante), círculos rojos ($F2$, segundo formante).⁴¹ Se han superpuesto también (líneas azules) las frecuencias correspondientes a cada tono: 82,5 Hz para la sexta y 110 Hz para la quinta cuerda.

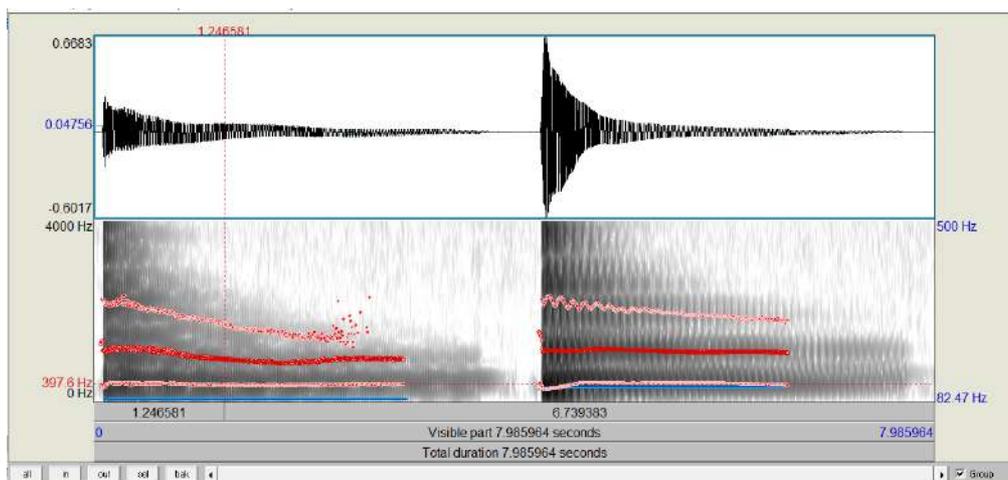


Figura 1.35. Sonidos emitidos por una guitarra al pulsar su cuerda sexta (izquierda) y su cuerda quinta (derecha), ambas al aire. Abajo se muestra el espectrograma de esos sonidos, sobre el que se ha superpuesto el cálculo de formantes (Boersma y Weenink, 2021): círculos blanquirrojos ($F1$) y rojos ($F2$). Se muestran también el “tercer formante”, y en línea azul las frecuencias del tono de cada sonido.

⁴¹ Se dejó también la representación del tercer formante, cuyo resultado cuestiona el propio concepto.

La tabla 1.3 muestra los resultados del cálculo de formantes (frecuencias F y anchos de banda B) para los dos primeros. Se han realizado mediante funcionalidades de Praat (Boersma y Weenink, 2021) y tomando el intervalo que se muestra en la figura, de forma que representan valores promedio para ese intervalo.

Formante	Cuerda 6a.	Cuerda 5a.
F1 (Hz)	376	385
B1 (Hz)	98	48
F2 (Hz)	967	1110
B2(Hz)	354	55

Tabla 1.3. Primeros dos formantes en el sonido de una guitarra al pulsar independientemente dos bordonas.

En una primera aproximación, considerando los dos primeros formantes del sonido emitido por dos bordonas de una misma guitarra pulsadas de forma consecutiva, podemos decir que existe un razonable acuerdo entre ellos. De poder extender este razonamiento a otros sonidos emitidos por un mismo instrumento en ciertas condiciones de tiempo y espacio, podremos utilizar este concepto para caracterizar instrumentos e intentar distinguirlos de otros.

En síntesis. En esta sección hemos intentado aportar elementos que fundamenten la afirmación que el concepto de *timbre* como atributo de los sonidos musicales es complejo. Tomamos las palabras de Miyara (2006) para explicitarlo: “es interesante observar que ni los formantes, ni las envolventes ni el espectro *tomados aisladamente* permiten explicar el timbre, que es más bien resultado de la interacción de todos estos factores.”

Guitarra: Modelos a baja frecuencia

“La guitarra puede considerarse un sistema de osciladores acoplados” afirman Fletcher y Rossing (2010) casi al comienzo del capítulo que trata sobre Guitarras y Laúdes. Complementan luego “la cuerda punteada radia solamente una pequeña cantidad de sonido directamente, pero esta excita el puente y la placa superior, la cual a su vez transfiere energía al aire de la cavidad, aros, y al fondo. El sonido es eficientemente radiado por la vibración de las placas y mediante la boca”.

Los autores proponen también un esquema simple para una guitarra, que tomamos y adaptamos para este trabajo (figura 1.36).

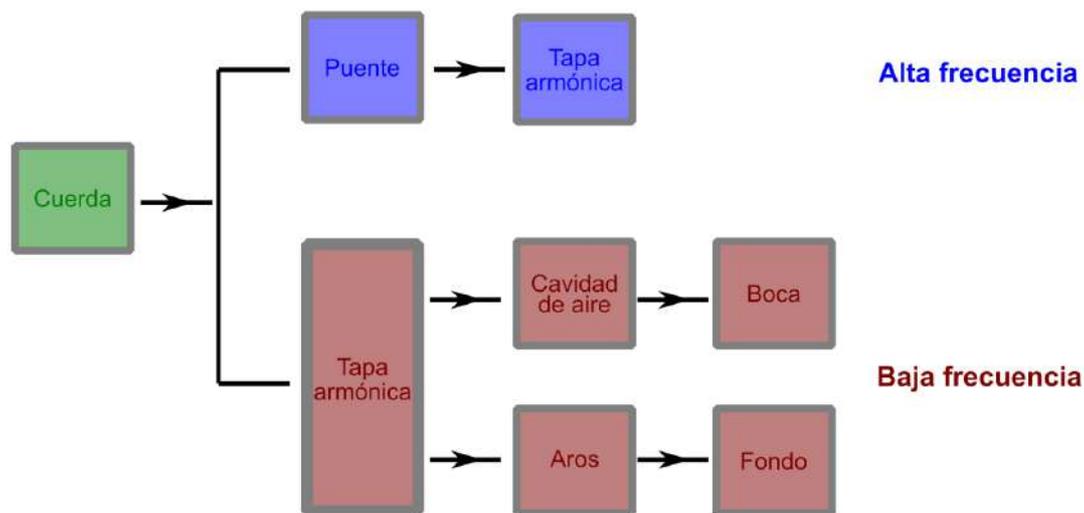


Figura 1.36. Esquema simple para una guitarra.

La síntesis que presentamos en esta sección refiere a modelos que permiten entender, en primera aproximación, la emisión de sonido de una guitarra en un rango de baja frecuencia. Como indica la figura 1.36 se asocia fundamentalmente a la placa superior (tapa armónica), el aire de la cavidad, la boca, los aros y la placa inferior (fondo).

Uno de los artículos consultados refiere al *modelo de dos osciladores* (el más simple que se ha encontrado en la bibliografía y literatura) para entender aspectos del funcionamiento de la guitarra en la zona de baja frecuencia (Christensen y Vistisen, 1980). En él se explica de forma cualitativa el acoplamiento entre la placa superior (tapa armónica) y el aire de la cavidad: “...en la guitarra, las vibraciones de la placa superior resultan en pequeñas variaciones en el volumen de la cavidad lo cual lleva a compresiones periódicas en el aire de la cavidad. Las variaciones de presión en el aire de la cavidad a su vez excitan el pistón de aire en la boca de forma que se establece un acoplamiento entre la resonancia de la placa superior y la resonancia de Helmholtz.”

Los autores reconocen el trabajo pionero de Meyer (1974) en un artículo originalmente escrito en idioma alemán, en el que se miden las respuestas de una tapa desmontada y de una cavidad de paredes rígidas, para compararlo con las dos primeras resonancias del instrumento ensamblado.

De esta forma se deja constancia que, aún la aproximación más simple al problema, requiere pensar en osciladores acoplados que serán modelados como un conjunto “masa-resorte” (la tapa armónica) y un resonador de Helmholtz (el aire en el cuerpo de la guitarra con el orificio de la boca). En la actividad 16 mostramos en la práctica los modelos que reseñamos en las secciones siguientes.

Modelo de dos osciladores

Un modelo de dos osciladores para aproximarse al funcionamiento de la guitarra a bajas frecuencias se estructura típicamente de la forma que se esquematiza en la figura 1.37. La placa superior (tapa armónica) se modela como un pistón de área equivalente A y masa equivalente m_p ⁴² unido a un resorte de constante k_p . El resonador de Helmholtz se modela con un “pistón de aire” de masa m_a , oscilando en conjunto con la rigidez del aire de la cavidad. En este modelo se consideran completamente rígidos la tapa posterior y los aros de la caja.

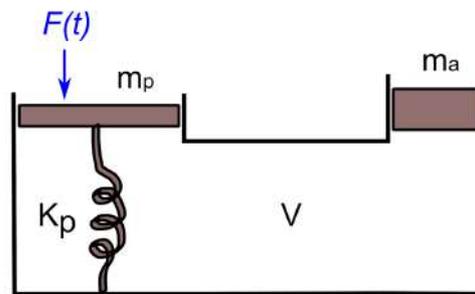


Figura 1.37. Modelo de dos osciladores acoplados.

El planteo detallado del modelo de dos osciladores acoplados puede consultarse en Christensen y Vistisen (1980). Nos proponemos aquí destacar los resultados que consideramos más relevantes para nuestro trabajo.

Dos vertientes complementarias se proponen en la literatura consultada:

- Se excita la tapa armónica de la caja de una guitarra con una fuerza $F(t)$ aplicada por ejemplo sobre el puente, y se mide la posición, o la velocidad, o la aceleración en un lugar cercano. En el ejemplo de una excitación sinusoidal, deberá “barrerse” con una señal de amplitud fija, un rango de frecuencias en el dominio de las bajas frecuencias (típicamente desde frecuencias pequeñas hasta algunos cientos de Hertz). En este caso se calcula una *función de respuesta en frecuencia*: $H(\omega)=Y(\omega)/X(\omega)$, siendo $X(\omega)$ la señal de entrada, e $Y(\omega)$ la señal de salida, ambas en el dominio de la frecuencia (French, 2008). En el ejemplo de la figura 1.38a, la señal de entrada es la Transformada de Fourier de la *fuerza aplicada*, y la señal de salida es la *velocidad*; definiéndose la *movilidad*⁴³ graficada.
- Se mide el nivel de presión sonora del sonido emitido por la caja del instrumento, en cierta posición, luego de ser excitado de alguna forma que involucre también un conjunto de frecuencias en el rango definido.

⁴² El subíndice “p” hace referencia a la denominación de la tapa “plate” en inglés.

⁴³ En el anexo de esta sección se la define.

El planteo anterior puede implementarse, si se dispone del instrumental adecuado, mediante un diseño experimental. Desde la teoría, puede resolverse el sistema de ecuaciones diferenciales que caracteriza el modelo de dos osciladores acoplados. ¿Cuáles son los resultados más destacados al resolver ese sistema de ecuaciones, al aplicarle una fuerza $F(t)$ sinusoidal a la masa m_p , para un conjunto de frecuencias definidas en el rango de interés?

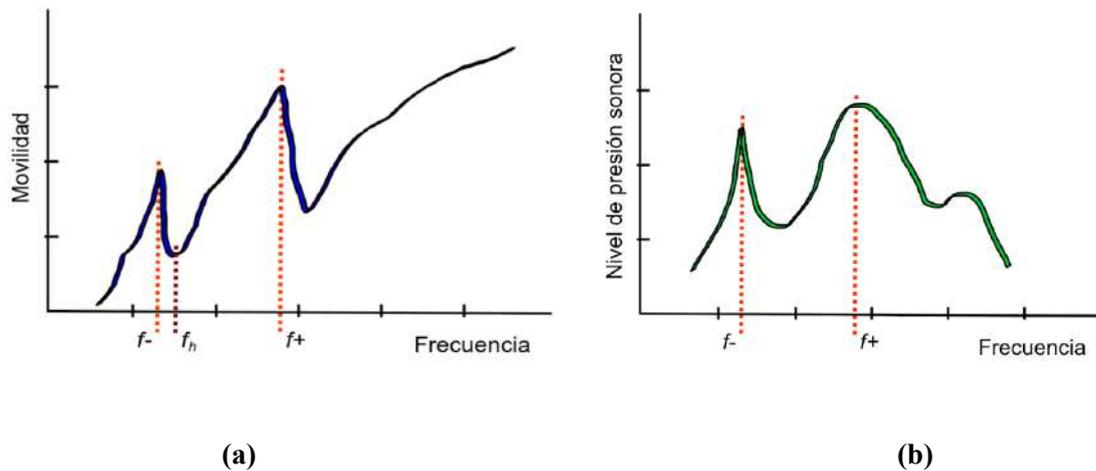


Figura 1.38. Representación esquemática de la movilidad en un punto de la tapa de una guitarra (a) y del nivel de presión de sonido (b), ambos en función de la frecuencia para un modelo de dos osciladores acoplados.

En la figura 1.38 (a) se muestra la *movilidad de un punto de la tapa* (en el modelo todo punto de la placa se mueve con la misma velocidad) en función de la frecuencia. Se destacan en ella dos picos asociados a las dos resonancias más bajas del sistema acoplado, cuyas frecuencias se nombran f_- y f_+ , correspondientes al primer y segundo pico, respectivamente. En el gráfico (b) se representa el nivel de presión sonora del sonido radiado, y se encuentran dos picos a las mismas frecuencias, más allá de que el comportamiento general no es idéntico al gráfico (a) (Christensen y Vistisen, 1980).

Un aspecto notable, que sólo se observa en el gráfico (a), es la presencia de una *anti resonancia*⁴⁴ a una frecuencia que se identifica como la *frecuencia de Helmholtz* (f_h). En particular, esta frecuencia NO es identificable en el gráfico (b) en el que se informa sobre el nivel de presión sonora del sonido radiado.

Un resultado que se obtiene del trabajo analítico con las ecuaciones diferenciales de partida, relaciona las frecuencias en que aparecen las dos primeras resonancias f_- y f_+ , la frecuencia de resonancia de Helmholtz de la cavidad, y la frecuencia *no acoplada* de la tapa superior, f_p :

$$f_-^2 + f_+^2 = f_p^2 + f_h^2 \quad (\text{ec. 23})$$

La ecuación 23 plantea que la suma de los cuadrados de las frecuencias de las resonancias de los osciladores acoplados es idéntica a la suma de los cuadrados de las frecuencias que corresponden a cada oscilador no acoplado. Una observación relevante es que (salvo que se use un procedimiento como el propuesto por Meyer) si medimos el nivel de presión sonora en un punto al excitar la caja armada, sólo tendremos acceso directo a

⁴⁴ Entendiéndose como los mínimos locales de la función movilidad en función de la frecuencia.

las frecuencias observables f_- y f_+ . Las frecuencias correspondientes a la antirresonancia f_h y la frecuencia de la placa superior f_p se encuentran *entre* las frecuencias de las resonancias f_- y f_+ . Si, como ocurre en la mayoría de las guitarras, $f_p > f_h$ esta última está más cerca de f_- que de f_+ (Meyer, 1974, citado por Fletcher y Rossing, 2010).

Las frecuencias que aparecen en el segundo miembro de la ecuación 23 son parámetros del modelo, a cuyos valores podremos acceder en forma experimental si, al menos, nos acercamos al desacoplamiento. Por ejemplo, si tapamos la boca de la guitarra estamos quitando el aporte del oscilador de Helmholtz⁴⁵. Esta técnica permite obtener una aproximación al valor de la frecuencia f_p . Estrictamente hablando f_p refiere a la frecuencia de la tapa *respaldada por la cavidad*, esto es, acoplada al aire encerrado en la caja cuando la boca de la guitarra está cerrada. Dicho valor, obviamente, difiere de la frecuencia de oscilación de la tapa sin la cavidad $f_{p,0}$ (Christensen y Vistisen, 1980).

En este trabajo exploramos algunos de los aspectos anteriores excitando la tapa de una caja de guitarra en la que se ha inmovilizado el fondo y los aros mediante su asiento en una cuba con arena. De esta forma nos aproximamos en el diseño experimental al modelo “dos osciladores acoplados”, en el que los aros y el fondo se asumen completamente rígidos.

Exploramos (además del sonido radiado con la boca tapada):

1. el que surge al cambiar el área de la boca (actividad 16),
2. el que emite cuando se coloca un tornavoz que cambia el largo del cuello de la boca (actividad 17),
3. y el caso en que se fija una masa adicional a la tapa armónica (actividad 18).

Modelo de tres osciladores acoplados

El modelo de tres osciladores incluye el movimiento de la placa inferior (fondo) de la caja: se agrega un tercer oscilador que lo representa. Se siguen considerando inmóviles los aros, de forma que el acoplamiento entre las dos placas se concreta mediante el aire de la cavidad.

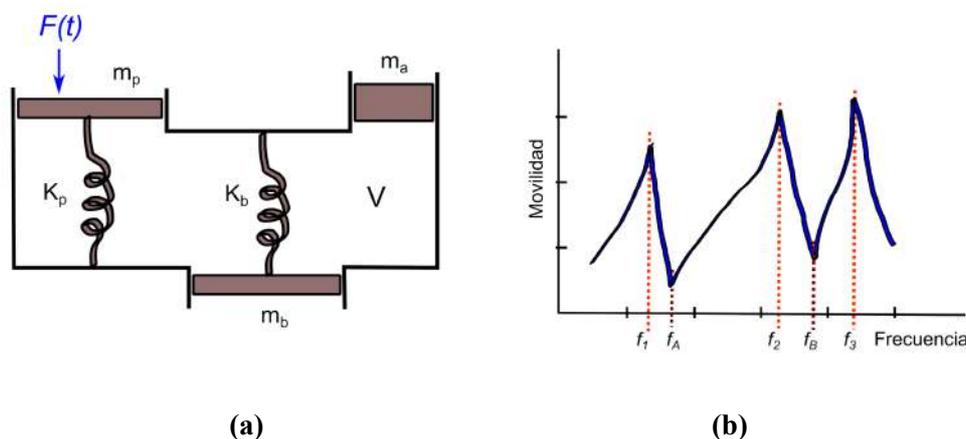


Figura 1.39. Modelo de tres osciladores acoplados. (a) Representación esquemática de un modelo mecánico, (b) Esquema del comportamiento de la movilidad en función de la frecuencia para ese modelo.

⁴⁵ En la Actividad 16 mostramos este resultado experimental.

La curva de respuesta para este modelo (de la movilidad, por ejemplo) presenta tres resonancias y una antirresonancia adicional. En la mayoría de las guitarras (para las cuales $f_b > f_p$ ⁴⁶) los efectos de “agregar este tercer oscilador” consiste en que tanto f_1 (f_-) como f_2 (f_+) disminuyen; en el caso contrario para el cual $f_b < f_p$, mientras f_1 (f_-) disminuye, el valor de f_2 (f_+) aumenta (Fletcher y Rossing, 2010).

Un aspecto complementario mencionado por estos autores refiere a una aproximación cualitativa a la forma en que se da el acoplamiento “tapa-cavidad-fondo” al menos en las situaciones en que los modos (0,0) (ver figura 1.17) de la tapa y el fondo tienen frecuencias similares, y para el caso en que la caja se sujete libremente. En relación a las tres primeras resonancias dicen Fletcher y Rossing (2010): *En la más baja de las tres resonancias, las placas superior y posterior se mueven en direcciones opuestas, por lo que la guitarra “respira” hacia adentro y hacia afuera por la boca de sonido. En la segunda resonancia, las placas superior y posterior se mueven en la misma dirección ... En la más alta de las tres resonancias, las placas se mueven de nuevo en direcciones opuestas, pero el aire en la boca de sonido se mueve en dirección opuesta a su movimiento en la resonancia más baja.* Mostramos esquemáticamente estas ideas en la representación de la caja vista de perfil en la figura 1.40.

Los autores mencionan también que el método de sujeción afecta de forma significativa a la frecuencia de la segunda resonancia, mientras que lo hace en menor grado a las frecuencias de la primera y tercera. Por tanto, la sujeción del instrumento y su control por parte de un ejecutante es una de las variables que permite incidir en el sonido radiado por el instrumento.

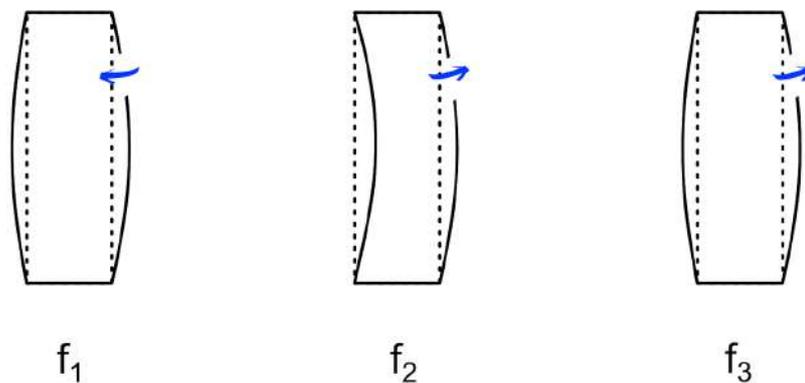


Figura 1.40. Acoplamiento de la tapa el aire de la cavidad y el fondo para las tres frecuencias más bajas del sistema acoplado.

Dado que las frecuencias f_- y f_+ pueden medirse en la representación del nivel sonoro en función de la frecuencia, mostramos en la figura 1.41 nuestros resultados para una caja de guitarra que se ha excitado sin tener inmovilizados aros y fondo (cuadrados rojos llenos) y con estas partes inmovilizadas mediante el asiento en una caja con arena (círculos rojos vacíos). En el primero aplicaría mejor el modelo “tres osciladores”, y en el último el de “dos osciladores”.

⁴⁶ El subíndice “b” hace referencia a la denominación del fondo “back” en inglés. La desigualdad refiere a que la frecuencia del modo fundamental del fondo es mayor que la de la tapa armónica.

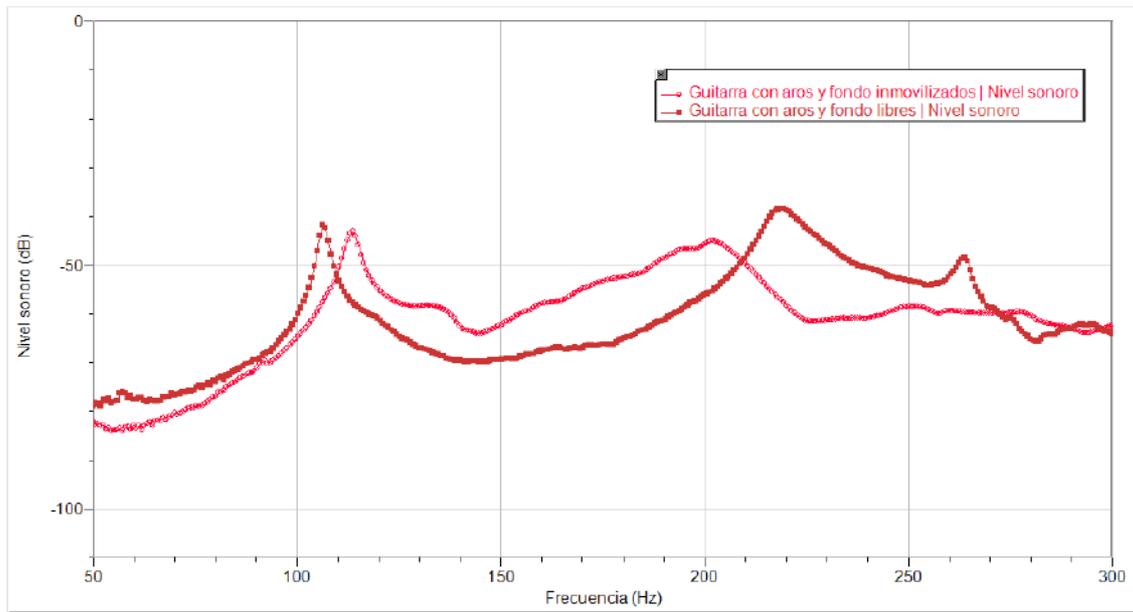


Figura 1.41. Nivel sonoro emitido por una guitarra con aros y fondo libres de oscilar (cuadrados color tomate) y con aros y fondo inmovilizados (círculos huecos en color rojo).

La figura 1.41 muestra una deriva del primer pico hacia las frecuencias bajas, y un corrimiento hacia las frecuencias altas del segundo pico, al inmovilizar aros y fondo de la caja. Acorde con la cita de un párrafo anterior estaríamos en el caso atípico en que $f_b < f_p$.

Anexo: Respuesta en frecuencia a una excitación

Para determinar el comportamiento dinámico de una estructura en el laboratorio, frecuentemente aplicamos una fuerza F en algún punto (x, y, z) y determinamos la respuesta de la estructura en el mismo punto o en otro (x', y', z') . Para describir la respuesta podemos medir desplazamiento r , velocidad v , o aceleración a (Fletcher y Rossing, 2010).

En situaciones sencillas la fuerza y la respuesta tienen la misma dirección, de forma que pueden considerarse vectores con componentes únicos: F , r , v , a , respectivamente. En tales casos, y luego de medir la fuerza y alguna de las respuestas, se pueden definir un conjunto de *funciones de respuesta en frecuencia*. Entre las que pueden tener interés se encuentran: *compliance* (x/F), *movilidad*⁴⁷ (v/F), *acelerancia* (a/F), *rigidez* (F/x), *impedancia* (F/v), *masa dinámica* (F/a). Si la respuesta se mide en el mismo punto en que se aplica la fuerza se usa el prefijo “driving-point” para la función calculada, y en caso de medirse la respuesta en un punto distinto al que se excita, se usa el prefijo “transfer” (Fletcher y Rossing, 2010).

Otros autores son más amplios al referirse a las funciones de respuesta en frecuencia. Richardson et al. (2012), mencionan como ejemplo (adicional) de estas funciones al *Nivel de presión sonora radiada por el instrumento* en un punto arbitrario del espacio libre, en respuesta a una fuerza de entrada (la llaman *Transfer response function*). En la misma línea, Leipp (1977) muestra un racconto de trabajos propios y ajenos en los que la representación de una “«*Courbe de réponse*» instrumentale” se concreta mediante el Nivel del sonido radiado por instrumentos de la familia del violín, en función de la frecuencia.

El instrumental que hemos utilizado en nuestro trabajo experimental no nos permite obtener curvas de respuesta en frecuencia en el sentido más estricto planteado por Fletcher y Rossing. Salvo que se indique otra cosa, mostramos *curvas de respuesta* que representan el *Nivel de sonido* radiado por el instrumento al ser excitado, medido en un punto del espacio libre cercano al mismo.

⁴⁷ Se llama también *admitancia*.

2

La Guitarra Clásica Moderna: la Española, la de Torres.

Un poco de historia

Antonio de Padua Pedro Cayetano de Torres Jurado, conocido como don Antonio de Torres (o Torres) es considerado el padre de la guitarra moderna tanto clásica como flamenca. Carpintero, músico⁴⁸, compositor, pero fundamentalmente *guitarrero* (término usado en España como sinónimo de constructor de guitarras y otros instrumentos de cuerda⁴⁹) fue capaz de rediseñar el instrumento existente en base a aportes propios y ajenos elevándolo hasta un nivel que lo reposicionó como un instrumento de concierto. Es en el intercambio con el mejor guitarrista de su época (su coterráneo) Julián Arcas que consigue los diseños destacados que asombran hasta nuestros días.

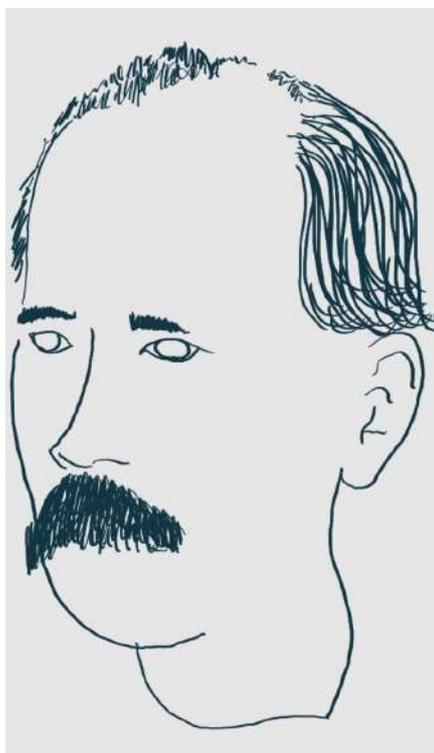


Figura 2.1. Antonio de Torres Jurado⁵⁰.

El 13 de junio de 1817 nace en la Cañada de San Urbano, Almería, España.

La familia se muda a Vera en 1829 donde el joven se forma como oficial carpintero (1835). Se casa y tiene cuatro hijos, los tres menores fallecen, luego fallece su mujer y Torres decide trasladarse a Granada donde se lo encuentra en 1847.

⁴⁸ Una nota de prensa del *Diario de Barcelona* n. 206 del 24 de Julio de 1884 (nota 87 en Romanillos 2020) afirma que de niño fue alumno de don Dionisio Aguado, pero esto no aparece en otras fuentes.

⁴⁹ También se les denomina *violeros* o *lauderos* a quienes se dedican a la construcción y reparación de instrumentos de cuerda pulsada o frotada. En el Río de la Plata se los conoce con el término *luthier* (o *lutier*), aunque en el uso habitual esta denominación se extiende a quienes se ocupan de cualquier tipo de instrumento musical.

⁵⁰ Agradecemos esta versión creada por Guillermo Trinidad Barnech a partir de las escasas fotografías de Torres existentes.

Es allí que se forma en la construcción de guitarras junto a José Pernas, el *guitarrero* más famoso de ese momento en esa ciudad⁵¹. Aparentemente vuelve a Almería donde construye la primera guitarra que se le conoce firmada con su nombre en 1852.

En 1853 se traslada a Sevilla e instala su taller muy cerca de quien sería su segunda gran influencia: Manuel Gutiérrez (ya que se han encontrado coincidencias en las plantillas utilizadas por ambos, en la tapa abombada, en el diseño del abanico armónico, en el conocido *filete verde* que se le atribuye a Torres, etc.).

Cuando llega a esta nueva ciudad se habían abolido los gremios. La enseñanza de oficios, que estaba hasta ese momento rígidamente reglada, se flexibiliza por lo cual en esta nueva situación cada artesano tuvo gran libertad para experimentar en nuevos diseños. Es probable que este ambiente propicio haya sido el marco que facilitó la experimentación, las búsquedas y creaciones que culminaron en el diseño de una guitarra muy superior a la existente (López & Navarro, 2019).

Es en ese período que construye las guitarras que se conocen como pertenecientes a la *primera época o FE* (first epoch, un término que les dio Romanillos) la cual se extiende desde 1852 hasta 1869.

Es en el año 1856 que se conocen con Julián Arcas y comienza una estrecha amistad y colaboración de enriquecimiento mutuo que duró todas sus vidas.

En 1858 presenta en la *Exposición agrícola, industrial y artística de Sevilla* una guitarra excepcional (la FE08 hoy conocida como "la cumbre") con la cual obtiene el primer premio en la categoría (medalla de bronce).

En 1865 se reencuentran con Julián Arcas en Madrid: uno pasando a formar parte del Conservatorio y el otro ofreciendo sus instrumentos para la venta.

En 1868 contrae matrimonio con su segunda esposa con la cual ya tenían tres hijos.

Por razones políticas y económicas se ve obligado a interrumpir su tarea y vuelve a Almería sobre 1869 para dedicarse a otras actividades comerciales.

Es sobre esos años que conoce a Francisco Tárrega al cual vende una guitarra y luego de un tiempo retoma la construcción de los instrumentos conocidos como de la *segunda época o SE* (término original de Torres) la cual se extiende desde 1875 hasta 1892 (el año de su fallecimiento). Es en ese período que visita Barcelona en 1884 y 1885 vendiendo y construyendo sus guitarras. Desde 1881 se instaló en la Cañada de San Urbano su tierra natal.

En 1883 fallece su segunda esposa.

En 1892 Torres fallece en Almería. Es enterrado allí y luego de unos años (en los cuales deberían haberse hecho gestiones para evitarlo) por razones que se desconocen sus restos pasan al osario común.

⁵¹ Si bien Romanillos (2020) lo incluye como dato biográfico en su obra, en entrevista para la Revista Orfeo N° 9 (2017) lo pone en duda; Dice que, si bien ese dato lo brinda Prat (1934), el mismo no está confirmado: tal vez Torres sea autodidacta. "...su trabajo no tiene nada que ver con el...de Torres: son más pesadas y el varetaje es diferente...no tiene el refinamiento...todo es más grueso y más pesado." También Evans (1977) que primero afirma (de acuerdo a Pujol) que fueron maestro y alumno y que la guitarra en forma de pera sería una demostración indirecta del vínculo entre ambos, posteriormente cita a Romanillos acerca de un posible documento que permitiría afirmar que no se conocieron.

Un nuevo estándar: nace la Guitarra Española o Torres

Si bien la vida de don Antonio estuvo signada por la tragedia familiar y económica eso no le impidió desarrollarse como renombrado constructor de las mejores guitarras e imponer un estándar en la construcción que marcó su época (en su país y a nivel internacional posteriormente a su desaparición física): un legado que nos acompaña hasta hoy.

El estándar de la guitarra española moderna sintetizado por Antonio de Torres Jurado puede resumirse en los siguientes puntos:

- 1) hace una precisa selección de maderas en cuanto calidad, corte y estacionamiento.
- 2) estandariza el “tiro” de cuerda (longitud de la cuerda libre entre los apoyos de ceja y cejuela) en 650 mm.
- 3) fija un conjunto de nuevas formas (“plantillas”) del contorno de la tapa (y fondo) con un lóbulo menor (o superior) y otro mayor (o inferior). Cambia el tamaño de la boca.
- 4) aumenta (en el valor medio del conjunto de sus plantillas) el área de la tapa y el fondo y la profundidad de los aros.
- 5) trabajo preciso en la redefinición de espesores de la tapa, aros y del fondo (muy inferiores al uso de la época).
- 6) nuevo diseño de puente con cejuela móvil en hueso.
- 7) tapa abombada.
- 8) abanico armónico “en cometa” con 5 a 7 varetas convergentes hacia el traste 12 (con algunas variaciones menores), “cerrado” mediante otras 2 dispuestas en “V” en la base del mismo.
- 9) experimenta, en sus primeros instrumentos (FE), nuevas sonoridades con la incorporación de la pieza conocida como “tornavoz” que luego (SE) abandona.
- 10) incorpora el uso del clavijero mecánico.
- 11) Redimensiona el diapasón aumentando los valores de ancho y espesor.
- 12) En cuanto a la estética del instrumento desarrolla un estilo de decoración delicado, elegante, sobrio, con detalles muy sutiles y muy difíciles de lograr donde se demuestra su gran maestría como artesano.

El "sonido Torres"

Las guitarras previas ya habían incorporado cuerdas simples y una sexta con el objetivo, entre otros, de adquirir un registro barítono, con notas más graves; sin embargo, eso no se logró ya que no se habrían modificado en forma correspondiente las dimensiones de la caja de resonancia ni de la estructura interna que lo permitiese.

Es muy difícil intentar definir las características del sonido de un instrumento musical mediante adjetivos que no sean vagos y/o ambiguos, pero haremos un intento de aproximación con algunas reseñas de la época y actuales. Por ejemplo, en su “Diccionario...” Domingo Prat (Prat 1934) informa que el escritor y crítico Paulino Masip en una nota de prensa del año 1929 dice que “en muy poco tiempo se ha pasado de la guitarra

de caja estrecha, dura de sonido, limitada y estridente, a la amplia, pastosa, suave y extensa que creó Torres”.

En su prólogo al libro de Romanillos (2020) de 1984 Julian Bream describe las características de las guitarras anteriores a Torres como procedentes de una “...metamorfosis...dramática desde un grácil instrumento contralto hasta lo que parecía ser otro de bajos profundos, como el violonchelo”. Sin embargo “...este cambio no se vio reflejado en una modificación de la caja de resonancia...para que se adaptase a las nuevas frecuencias graves”.

Romanillos afirma en entrevista para la Revista Orfeo N° 9 (2017) que uno de los aportes más destacados fue el de encontrar cómo incrementar la resonancia en el registro de los graves; para ello utiliza el *tomavoz* (FE), maneja en forma magistral las elasticidades y la estructura de la tapa y el instrumento en su conjunto, etc. También se destaca su profundo conocimiento de la madera ya que demostró saber cómo manejar su continuo movimiento en función de la temperatura y humedad.

Evans (1977) dice que tienen “...un sonido más fuerte y rico, con una gama más amplia de respuesta tonal...un tono claro, equilibrado, firme y redondo”.

En el *Capítulo 13 El “sonido Torres”* de su obra Romanillos (2020) utiliza adjetivos propios y ajenos para describir lo que no se puede decir con palabras: “amplia paleta expresiva”, “nueva gama de sonoridades, efectos y dinámicas”, “carácter sensual y romántico”, “calidad tonal”, “sencillez y pureza”, “registro grave sonoro” (referido a notas graves) y “claridad” (referido a notas agudas), “armonías...dulces”, “cálida espontaneidad y equilibrio”, etc.

Torres logra obtener con su nuevo diseño un instrumento solista con una sonoridad polifónica de carácter muy particular que destaca no solo por su mayor volumen sino por la claridad en las voces en todo el rango dinámico ofreciendo una gama de matices óptima para componer y ejecutar piezas tanto con pasajes de muy bajo nivel de sonido (*pianísimos*) como en los de nivel alto (*fortes*) (López & Navarro, 2019).

La nueva guitarra (“la *española*, la *de Torres*”) permitió, tanto a los guitarristas de su época como Julián Arcas, Antonio Jiménez Manjón, Francisco Tárrega, etc. como a sus discípulos y/o sucesores como Miguel Llobet, Emilio Pujol, Andrés Segovia, etc., redefinir la música que ejecutaban y/o componían y reposicionar a la guitarra como un instrumento de concierto.

Discípulos

Los datos históricos disponibles permiten afirmar que don Antonio prácticamente no tuvo discípulos por lo cual no existe un legado directo de su trabajo. Si bien el padre Martínez Sirvent (1931) afirma que el luthier habría respondido lo siguiente cuando se le consultó acerca de la posibilidad de transmitir sus creaciones: “...es imposible que yo llegue a la posteridad el secreto; este irá a la tumba con mis restos, puesto que consiste en el tacto de las yemas de los dedos pulgar e índice que le comunican a mi inteligencia si la tapa está o no bien labrada para responder al genio del constructor y a la sonoridad del instrumento”, los hechos indicarían que (aparentemente) no tuvo interés en que sus conocimientos fueran adquiridos por terceros.

En los últimos años de su vida el padre Martínez Sirvent le ayudó en algunas tareas delicadas que ya no podía realizar. Aclara que cuando se reunían el maestro cerraba la

puerta del taller con llave para que ni los más íntimos pudieran ver el proceso. Su hija Matilde era la única autorizada a entrar al lugar de trabajo.

El único discípulo que se le conoce fue Joaquín Alonso (1873). Sin embargo, se dice que Torres autorizó a Miguel Moya Redondo para que en sus etiquetas dijese que era su discípulo. También es un hecho conocido que José López Beltrán firmó sus guitarras como "único discípulo de Torres" (1894).

Torres después de Torres: la Guitarra Española para el mundo

Tras la desaparición física del luthier los guitarristas buscaron en España y el resto de Europa artesanos que pudiesen reparar las guitarras Torres existentes o bien replicarlas.

Fue en esa búsqueda que en el año 1924 Miguel Llobet y su discípulo Andrés Segovia visitan en Alemania a Hermann Hauser para que haga una réplica. Éste queda tan impresionado con el instrumento que pasa a fabricar según ese estándar, aunque con agregados propios. En Madrid ese papel lo cumple Manuel Ramírez quien tendrá como discípulos (entre otros) a Santos Hernández, Domingo Esteso, Modesto Borreguero y Enrique García. Este último se instala luego en Barcelona donde será maestro de Francisco Simplicio. Es a partir de ese período histórico que gran cantidad de *guitarreros* comenzaron a formar en sus talleres aprendices que se multiplicaron en el Modelo Torres o bien haciendo base en él. Puede encontrarse el vínculo desde entonces y que alcanza a Ignacio Fleta en Barcelona, Robert Bouchet y Daniel Friederich en Francia, etc.

Según Romanillos (2020) una de las mayores contribuciones a la expansión de los principios constructivos de Torres tanto para guitarreros como para aficionados fue la publicación del artículo "Torres, the creator of the modern guitar" en la revista norteamericana *Guitar Review* N° 16 de 1954 el cual contiene el plano a escala incluyendo detalles de sus medidas de la guitarra FE26 de Theodore M. Hofmeister⁵² Jr. en Hofmeister (1954).

Ese conocimiento se esparció por el mundo llegando también hasta nuestro país.

Las ideas de Torres en Uruguay

Según relata Prat en su "Diccionario..." (Prat 1934) el *guitarrero español* Adolfo Obiol, discípulo de "Senchordi" (sic) en Valencia (España), se instala en el Río de la Plata (definitivamente a partir de 1875) para construir y enseñar según el Método Español. Debe destacarse este hecho ya que 17 años antes de la desaparición física de Torres ya se difundía su obra y se construía según sus diseños en nuestro país. Formó gran cantidad de discípulos lo cual tuvo como consecuencia el descenso de las importaciones de instrumentos desde España.

Si bien en el mundo es común referirse a Torres como "el Stradivarius de la guitarra"⁵³ debe hacerse notar que en nuestro país (y parece que aún en gran parte de España) prácticamente no se conoce su nombre y mucho menos su obra, mientras que la figura del luthier italiano forma parte de la cultura general⁵⁴.

⁵² En el título del artículo aparece el apellido escrito de esa forma. Sin embargo, tanto en el plano, foto y cuerpo del mismo se puede leer *Hofmeister*.

⁵³ Sin embargo, Prat considera que el luthier Enrique García sería el merecedor natural de esta denominación.

⁵⁴ Debemos, no obstante, considerar que Stradivari es muy anterior a Torres por lo cual es entendible que se haya acumulado mayor conocimiento y fama en torno a su obra.

Un esfuerzo en el sentido de la recuperación de la historia se produjo en el año 2013 cuando el Ayuntamiento de Almería inauguró el Museo de la guitarra Antonio de Torres

(<https://almeriaciudad.es/cultura/lugares-de-interes/museo-de-la-guitarra/>) dedicado a la guitarra y demás instrumentos musicales y al famoso maestro.

A nivel local debe destacarse y agradecerse al luthier Ariel Ameijenda la permanente tarea de difusión de la figura y obra de Torres que lleva adelante desde hace años en nuestro país. Esperamos que nuestro trabajo constituya un aporte a la justa difusión de la obra creadora del gran *guitarrero*.

Brevísima enumeración de los orígenes de los luthiers, guitarreros y fabricantes de guitarras en nuestro país⁵⁵

Hasta donde nos fue posible averiguar, no existe una historia que enumere en forma sistemática y actualizada ni brinde información de los artesanos que han iniciado y/o desarrollado su labor en nuestro país, lo cual nos parece una gran injusticia ya que gracias a ellos muchos músicos han podido concretar sus creaciones. Es por ello que a continuación hacemos una brevísima enumeración de la información más relevante a la cual hemos accedido de quienes dieron comienzo al desarrollo del oficio en nuestro país (junto a sus principales discípulos) y otros fabricantes. Las fuentes para ella fueron, entre otras, el “Diccionario...” (Prat 1934), entrevistas a familiares, guitarristas y luthiers, entrevistas grabadas o directas a los luthiers, información obtenida de documentos y publicaciones históricas obtenidas en internet y el trabajo inédito “Panorama de la guitarra uruguaya” (versiones 1996 y 2018) que nos compartió muy gentilmente el Lic. Ramiro Agriel.

Todo error u omisión que pudiere existir no es intencional y es únicamente producto de nuestra incapacidad de alcanzar un registro como el buscado. Ofrecemos desde ya las disculpas a quienes puedan sentirse afectados por dichas faltas. Debemos aclarar también que debido a la organización centralizada de nuestro país las informaciones existentes a las que pudimos acceder son fundamentalmente referidas a actividades que sucedieron en su capital Montevideo.

De más está decir que esperamos que en el futuro exista una iniciativa de concretar una ampliación para lograr un registro completo, tarea imprescindible desde el punto de vista histórico y artístico.

El primer registro vinculado a la violería al que tuvimos acceso informa del cierre del Taller de Agustín Caminal (Calle de San Juan cerca de Plaza Matriz) en 1841.

Sebastián Fulquet fundó su *Guitarrería Española* en 1859 la cual trabajó hasta 1891 produciendo gran cantidad de instrumentos.

Sobre el año 1890 Tomás Esteban (padre) estaba instalado en Montevideo considerándose el luthier más acreditado de entonces.

Uno de los aprendices más destacados de Adolfo Obiol fue José Del Puerto (Montevideo, 1874) quien trabajaría luego con Tomás Esteban (padre) para luego instalarse en Buenos Aires (1893).

José Pau (Valenciano) también se encontraba trabajando en Montevideo a fines del siglo XIX.

⁵⁵ Método Torres o no.

Juan Pau Tomás, español (1890-1942) arribó a Montevideo en 1909 para desarrollar el oficio⁵⁶.

Rodolfo Camacho Viera (Montevideo, 1887), hijo de un constructor de guitarras andaluz, vivió y trabajó en Uruguay hasta trasladarse en 1904 a Buenos Aires donde sus guitarras recibieron grandes elogios tanto de Andrés Segovia como de Agustín Barrios.

Se tiene registro en Montevideo del trabajo de Miguel Merialdo sobre 1930 y de Guillermo Calabrese entre 1934 y 1940.

Un caso particular radicado en el interior del país es el del carpintero rochense Dino Menichini quien tuvo formación como guitarrero con Agosto Miranda y en forma particular con Juan Carlos Santurión y habría fabricado gran cantidad de instrumentos a partir de 1935.

También por aquellos años se desempeña José Ballester (1920, Montevideo) sobrino del luthier Juan Pau Tomás de quien aprendiera el oficio. Instala su Taller en 1938. Su hermano también fue constructor.

Los guitarristas y guitarreros Pedro Vittone (quien además fuera profesor de guitarra de Abel y Agustín Carlevaro) y Héctor Carlevaro (1890-1971, tío de aquellos) también trabajaron construyendo instrumentos en ese período⁵⁷.

El caso de Antonio Pereira Velazco (3/1/1900, Dolores, Dep. de Soriano) es muy particular ya que se trata de un luthier autodidacta⁵⁸ quien alcanzó tal nivel de calidad que permitió que sus guitarras viajaran por el mundo y fueran ampliamente valoradas. Se sabe que se formó desde muy joven inicialmente como carpintero a partir de 1913 en Carmelo y desde 1915 en Montevideo y posteriormente se especializó en ebanistería. Construyó su primer instrumento en 1916 copiándolo de otro que le llevaron para reconstruir. Sobre 1938 comienza su amistad con el célebre guitarrista español Andrés Segovia -quien vivía en Uruguay- cuando le repara la Hauser con maestría. Segovia le permitió estudiar su Manuel Ramírez la cual el luthier comenzó a usar como base para sus construcciones. El músico tuvo tres instrumentos del artesano (aunque no los usó para sus conciertos hasta donde sabemos).

El célebre músico compatriota Eduardo Fabini tuvo una guitarra de Pereira Velazco la cual se exhibe en el Museo que lleva su nombre⁵⁹.

Pereira Velazco tuvo un único discípulo: Hilario Barrera.

Hilario Barrera (4/3/1934, Barriga Negra⁶⁰, Dep. de Lavalleja, 31/5/2017) un luthier cuyos instrumentos son muy reconocidos y quien fuera muy apreciado por colegas y músicos⁶¹ trabajó en su taller de Montevideo antes de instalarse en Barros Blancos, Dep. de Canelones en 1951. Junto a él desempeñó el oficio la primera mujer de la cual tenemos

⁵⁶ Desconocemos si existió algún vínculo familiar entre ambos Pau.

⁵⁷ Este último fabricó 24 instrumentos que nunca vendió. La N° 20 fue la famosa "rubia" con la cual su sobrino y hermano de Abel el arquitecto, arreglista y gran músico Agustín Carlevaro (1913-1995) hizo la mayoría de sus grabaciones.

⁵⁸ Se fabricó todas las herramientas para desarrollar el oficio, inclusive una sierra eléctrica con la estructura en madera.

⁵⁹ Acceso en: http://www.museos.gub.uy/index.php?option=com_k2&view=item&id=56:museo-eduardo-fabini

⁶⁰ En entrevista realizada por Javier Cabrera, don Hilario relata que, si bien a la semana ya residía en Barriga Negra, en realidad nació en el Hospital de Batlle y Ordoñez (localidad que en ese tiempo se llamaba Nico Pérez), Dpto. de Lavalleja.

⁶¹ La primera guitarra construida por Barrera en 1967 fue adquirida por nuestro notable guitarrista, compositor y cantante Daniel Viglietti.

registros dentro del mismo: Sonia Di Doménico (1945-2020). Una semblanza de ella aparece en el anexo siguiente.

El otro discípulo de Barrera es el músico, compositor y luthier Ernesto Tarduña.

Sobre 1950 sucede en nuestro país un hecho fundamental para el futuro de este arte: el guitarrista y luthier Juan Carlos Santurión†⁶² (Aguas Corrientes, Depto. de Canelones) viaja a Barcelona con una beca que le habría otorgado el gobierno de la época con el objetivo de perfeccionarse en el Taller de Ignacio Fleta.

Una vez retornado al país funda el *Curso de Luthería* en la UTU (*Universidad del Trabajo de Uruguay* conocida en ese tiempo como “Escuela Industrial”). Esta posibilidad de capacitación en el oficio permitiría a partir de entonces la educación de generaciones de luthiers/guitarreros en nuestro país. Dichos cursos se imparten hasta hoy formando en la construcción de guitarra clásica (<https://escueladeartesyartesanias.edu.uy/sitio/ensenanza>). Las herramientas que inauguraron esos primeros talleres habrían sido adquiridas a Guillermo Calabrese que cerraba su Taller por esos años.

Dos de los discípulos directos formados por Santurión (el cual estuvo a cargo de los cursos durante el período 1953-1970) que tuvieron actuación posterior destacada en el oficio, Manuel Ameijenda y Rodolfo Rodríguez Seijas, lo sucedieron una vez que el maestro se retiró: el primero durante el período 1970-1980 y el segundo entre 1982 y 1995.

En la década del 60 llega a nuestro país el luthier español Juan Orozco⁶³† quien se instala en Montevideo hasta los 70' (aproximadamente). Bajo sus directivas se forman y/o perfeccionan varios artesanos entre los cuales se encuentran Paris Banchetti y Manuel Ameijenda. El español construye guitarras en forma artesanal para luego fundar una fábrica de producción en serie⁶⁴ que proveyó bajo su firma (por lo menos) a la *Casa de instrumentos musicales PRAOS* la cual las comercializaba en plaza en grandes volúmenes. Posteriormente se radica en Estados Unidos como fabricante de cuerdas.

También llega a nuestras tierras José López Cubillo, primer oficial del taller José Ramírez II, quien trabajó junto a Manuel Ameijenda entre 1957 y 1959.

Un caso muy particular es el del músico y cantante Manuel Ameijenda† (1921) quien se forma como luthier con Santurión⁶⁵ sobre 1953 para dedicarse luego a la construcción de guitarras finas⁶⁶. Desde su formación ejerce en forma ininterrumpida el oficio y es seguido por su hijo Ariel Ameijenda (1963, músico, docente y luthier: <https://ameijenda.com/>) quien lo desempeña con reconocimiento internacional hasta la fecha. Actualmente esta familia cuenta con la tercera generación dedicada a la construcción de guitarras. Hasta donde llega nuestro conocimiento es el único caso que conocemos en Uruguay de una historia perfectamente documentada de un Taller con tres generaciones continuadas de luthiers. Un resumen de esta historia se puede ver en el emotivo vídeo homenaje con motivo de los 100 años de su fundador realizado por su hijo Ariel y su nieto Ismael: <https://youtu.be/09jvmPFOSmc> .

⁶² Una guitarra construida en 1952 por Santurión para el gran compositor y guitarrista Julio Martínez Oyanguren (1901, Dep. de Durazno, fallecido) forma parte del acervo (y fue exhibida hasta hace poco) del Museo Histórico Casa de Rivera (<http://museos.gub.uy/component/k2/item/43-museo-hist%C3%B3rico-casa-de-rivera>).

⁶³ Existen algunos relatos que indican que este artesano habría sido discípulo del célebre luthier español Santos Hernández, pero no lo hemos podido confirmar en forma fehaciente.

⁶⁴ La cual ya se encontraba funcionando en 1966.

⁶⁵ Puede consultarse una entrevista que se le realizó en 1961 para la Revista *Reporter* (*Reporter*, 1961).

⁶⁶ Puede consultarse su artículo *Apuntes sobre historia y construcción de la guitarra* en BSE 1987.

Otro de los discípulos directos de Santurión es el luthier y docente Rodolfo Rodríguez Seijas (8/8/1936, Dep. de Maldonado). Luego de su formación como carpintero, ebanista y luthier en 1960 se dedica a la construcción de guitarras hasta 1965 y retoma nuevamente en 1980. Trabajó para la Casa PRAOS. Viaja a España visitando los Talleres de Ramírez, Contreras y Fleta para profundizar su formación. Posteriormente continúa viaje hacia otros países de Europa en los cuales conoce a Hermann Hauser y Daniel Friederich. Varios de sus instrumentos habrían sido encargados y vendidos a Estados Unidos, Francia y otros países. El guitarrista y luthier Bruno Casciani (quien dicta cursos de construcción de instrumentos hace años en forma particular: Instagram @brunocasciani) es discípulo de Rodríguez Seijas.

Otro ejemplo de extranjeros que se formaron y desarrollaron su tarea en nuestro país es el de los hermanos italianos Arnaldo, Germano⁶⁷ y Paris Banchetti. Un resumen de su historia y trabajo está incluido en una semblanza (ver Anexo) que Marina, la hija de Paris, redactó especialmente para este trabajo sobre su padre y tíos.

Eduardo Francisco Miranda† (1922, Argentina) y su hijo Luis Eduardo Miranda† (1951-2018), también se dedicaron a la construcción de guitarras⁶⁸. El primero trabajó en la Casa PRAOS junto a Juan Orozco. También se dedicó a la fabricación de cuerdas para guitarra.

El músico Romeo Rodríguez Mieres también construye desde hace décadas en Montevideo.

Otras guitarras que se comercializaban eran *Caruso* (luthier que emigra en 1975) y *Jaime Cortes*.

Además de los guitarreros que hemos mencionado varias fábricas y casas de comercio se dedicaron a la construcción en serie y/o venta de instrumentos (en general de calidad *estudio*) alcanzando volúmenes de comercialización muy importantes. Entre ellas, además de la ya nombrada Casa *PRAOS* (inicialmente *PRAUS*) la cual ofrecía las marcas *Orozco* y *Pierini*, podemos citar *Ottado* y *Garrido* con marca propia, Fábrica de acordeones y guitarras *VORDINI*⁶⁹ (Santa Lucía, Departamento de Canelones) con marca propia, *Palacio de la Música* que vendía *Sentchordi* y *Casa Beethoven*.

⁶⁷ Este luthier construye en 1977 la primera *Dinarra*, un instrumento microtonal inventado por el Químico Farmacéutico uruguayo Eduardo Sábat-Garibaldi.

⁶⁸ Este último construye sobre 1980 la primera guitarra *Modelo Carlevaro* que inventara Abel Carlevaro. Las siguientes fueron encargadas al luthier español Manuel Contreras. Las características más importantes del nuevo diseño radican en sustituir la boca por una abertura perimetral en la periferia de la caja y eliminar la curvatura del aro superior (o izquierdo vista la guitarra de frente) uniendo los lóbulos menor y mayor por un tramo plano.

⁶⁹ Esta fábrica llegó a producir 800 guitarras por mes en 1969 (Nuestra tierra 1970).

Semblanza de Paris Banchetti y sus hermanos Arnaldo y Germano

El luthier Paris Banchetti ganó fama internacional por sus guitarras de gran calidad y poderoso sonido. Nació en Roma en el año 1930 y creció en Arezzo, donde trabajó como ebanista hasta emigrar a São Paulo en los años 1950. Mientras vivía en Brasil, aprendió del luthier Juan Orozco a construir guitarras artesanales de estilo español. El mismo Orozco fue alumno del legendario guitarrista madrileño Santos Hernández.

Después de dominar este arte, Banchetti se trasladó a Montevideo para montar su propio taller, donde hizo instrumentos de cuerda para muchos músicos sudamericanos importantes como el legendario cantante folclórico uruguayo, Alfredo Zitarrosa. Mientras en Montevideo, Banchetti enseñó el arte de hacer guitarras a sus dos hermanos, Germano Banchetti y Arnaldo Banchetti, que fue conocido en Europa como Luis Arban.

Eventualmente, Banchetti se trasladó de Uruguay a Francia en 1968 y vivió allí hasta 1975. Mientras estaba en Francia, la reputación de Banchetti como un fabricante de guitarras talentoso continuó creciendo y finalmente se le ofreció un contrato de trabajo para mudarse a los Estados Unidos, estableciéndose en Miami.

Banchetti montó un taller artesanal y trabajó en Miami durante los siguientes 36 años, haciendo guitarras clásicas y populares, bajos verticales y violonchelos y reparando instrumentos de cuerda para músicos de todo el mundo. Llegó a ser muy respetado internacionalmente por su impecable artesanía y extraordinaria atención al detalle.

En 1985, Banchetti hizo una contribución única al mundo de la música cuando inventó y patentó el hermoso bajo práctico Banchetti, el único bajo vertical eléctrico con un sistema de dos pastillas que produce un sonido moderno y acústico, lo que es perfecto para actuaciones de jazz y rock. Este y sus otros instrumentos han sido tocados por músicos como la guitarrista Muriel Anderson, el bajista de jazz Rufus Reid, el bajista de Frank Sinatra Ray Brown, el bajista de Billy Joel Doug Stegmeyer, y el bajista de Natalie Cole Richard Campbell.

Paris Banchetti falleció a la edad de 89 años, el 9 de marzo de 2019 y le sobrevive su única hija, Marina Paola Banchetti.

Nota: Esta semblanza fue redactada especialmente para este trabajo por su hija Marina Banchetti.

Semblanza de Sonia Di Doménico

Sonia Di Doménico fue una artista polifacética. Una artista en el más cabal sentido de la palabra artista.

De sus manos surgieron poemas, dibujos, historietas, grabados, un largo etcétera... y guitarras.

A partir de 1973 y por intermedio de su maestro Hilario Barrera, se constituyó en la primera mujer luthier de nuestro país.

La primera guitarra que salió de sus manos fue el regalo para una querida amiga que estudiaba en el Conservatorio.

Luego salieron otras, pero su verdadera pasión era restaurarlas. Con gran amor y dedicación, colocaba en las entrañas las espinetas, en la boca el nácar, el lustre en la tapa, el fondo y los aros.

Como Sonia decía, "lo más importante de mi cuerpo son las manos". Por más de 40 años sus manos apretaron prensas y acumularon dolor.

Nota: Esta semblanza fue redactada especialmente para este trabajo por su amiga Ivonne Spinelli. Agradecemos a Marta Artagaveytia el haber realizado las gestiones para contar con este recuerdo.

El Método Español o Torres

El *Método* de construcción de guitarra que se conoce mundialmente como *Español o Torres* podría resumirse (muy básicamente) en los siguientes pasos:

a - Tapa armónica

Enrasado y encolado de mitades para conformar la tapa

Corte del perfil de la tapa

Calibrado de la tapa. Lijado.

Rebaje del canal en la tapa para incrustar la roseta (o embocadura).

Incrustado y encolado de la roseta en su canal de la tapa. Rebaje de la roseta hasta el nivel de la tapa. Lijado.

Apertura de la boca. Lijado.

Encolado de varetas del abanico armónico a la tapa. Este procedimiento se puede hacer en el *Gobar* presionando las varetas del abanico armónico contra un molde cóncavo para definir el domo del lóbulo mayor de la tapa.

Tallado del abanico armónico. Lijado.

Corte, tallado de la curvatura y encolado de las barras armónicas a la tapa

Tallado de barras armónicas. Lijado.

Corte y encolado de las láminas de refuerzo de boca. Tallado. Lijado.

b - Brazo

Corte y encolado de piezas del zoque.

Corte y calibrado de cabeza y mástil.

Encolado de la cabeza al mástil.

Encolado del cubrecabeza⁷⁰ (o cubrepala) y adorno a la cabeza.

Cortes para dimensionado y perfilado del contorno de la cabeza.

Cabeza: Calado de los dos canales para las cuerdas y perforación de orificios para los pernos del clavijero. Lijado.

Encolado de zoque al mástil (a este conjunto le llamaremos *brazo*)

Cortes laterales para dimensionado del mástil.

Corte de ranuras en el zoque para insertar los aros y las cuñas (según Romanillos).

Tallado del zoque: a su porción externa le llamamos talón (o quilla) y a la interna pie. Lijado.

Rebaje de la base del mástil en la zona de encolado de la tapa

Aplicación del acabado: lustre francés (gomalaca aplicada a muñequilla) al zoque exceptuando los canales para cuñas y las zonas de encolado de tapa y fondo.

c - Encolado de tapa y brazo

d - Aros y culata

Corte de la culata (o taco base). Ajuste para el encuentro de su borde superior con la tapa. Lijado.

Corte y calibrado de aros.

Domado de aros.

⁷⁰ Se trata de una lámina de madera de unos 2 mm de espesor que habitualmente se encola a la cara anterior de la cabeza con fines de refuerzo mecánico y estéticos.

Corte de los extremos de los aros para ajustarlos a las ranuras del zoque y para que sus extremos inferiores enrasen entre sí al encontrarse en la culata.

e- Encolado del conjunto tapa y brazo a los aros y culata

A esta altura del proceso pueden seguirse alguno de los siguientes tres caminos:

1. Preparación y encolado del contra aro (o contrafaja) estriado de tapa y fondo a los aros. Ajuste para el encuentro con la tapa. Aplicación del acabado: lustre francés (gomalaca aplicada a muñequilla) al interior de los aros y contra aros.

Inserción y encolado de aros en las ranuras del zoque conjuntamente con las cuñas (según Romanillos). Encolado de aros a la tapa. Encolado de la culata a los aros. (Este procedimiento se hace en base a la solera, un útil que sirve de molde al conjunto).

2. ídem, pero se deja para el final el encolado del contra aro estriado de fondo a los aros. Lijado y aplicación del acabado: lustre francés (gomalaca aplicada a muñequilla) al contra aro de fondo.

3. Corte de peones.

Inserción y encolado de aros en las ranuras del zoque conjuntamente con las cuñas (según Romanillos). Encolado de aros a la tapa. Encolado de la culata a los aros. (Este procedimiento se hace en base a la solera, un útil que sirve de molde al conjunto).

Encolado de peones a la tapa y aros.

Encolado de contra aro estriado de fondo a los aros. Lijado y aplicación del acabado: lustre francés (gomalaca aplicada a muñequilla) al interior de los aros y contra aro estriado de fondo.

f- Fondo

Enrasado y encolado de mitades para conformar el fondo (puede añadirse un adorno en medio de la unión)

Corte para definir el perfil del fondo

Calibrado del fondo

Corte y encolado del tapajuntas (o refuerzo del fondo) al fondo. Tallado. Lijado.

Corte, tallado de curvatura y encolado de las barras de refuerzo del fondo al fondo. Tallado. Lijado.

Corte y encolado de los peones de las barras armónicas contra los aros. Lijado.

Corte y encolado de los peones de las barras de refuerzo de fondo a los aros. Lijado.

Encolado de etiqueta del luthier al fondo.

Ajuste del nivel del contra aro de fondo para el encuentro con el fondo.

g- Encolado del fondo al resto del instrumento

h- Colocación de terminaciones (cenefas, selleta, etc.), acabado y ajustes finales

Ruteado de canales para cenefas

Domado y encolado de cenefas

Corte y encolado de la tapa del talón.
Rebaje y lijado de cenefas
Calado del canal para incrustar la selleta (pieza contra la cual se encuentran los extremos inferiores de los aros).
Encolado de la selleta.
Corte y rectificado del diapasón. Ranurado de canales para insertar los trastes.
Encolado del diapasón al mástil.
Entrastado del diapasón.
Tallado de la curvatura de la cara posterior del mástil
Lijado general del instrumento.
Enmascarado de zonas a proteger del acabado (interior, diapasón, área de encolado del puente).
Aplicación del acabado: lustre francés (gomalaca aplicada a muñequilla).
Corte, tallado, perforado y lijado del puente. Aplicación del acabado al puente.
Encolado del puente a la tapa.
Corte y ajuste de ceja y cejuela.
Encordado del instrumento.
Ajustes finales (entre los cuales podemos citar el ajuste de la *acción* de las cuerdas y el *compensado* mediante tallado de la cejuela para optimizar la afinación de cada cuerda).

La Guitarra FE14 “la guitarra de *papier mâché*” (papel maché) o “de cartón” de Antonio de Torres Jurado (1862)

En 1862 don Antonio de Torres Jurado, poeta, compositor, guitarrista y *guitarrero* español considerado el padre de la guitarra clásica moderna, construye un instrumento icónico, casi mítico (término que usa Joan Pellisa): su “guitarra de papel maché” o “de cartón” (catalogada como FE14 por Romanillos). La misma fue concebida, entre otras particularidades, con el fondo y los aros contruidos no de madera sino de cartón.

Las primeras referencias que encontramos a ella es la siguiente:

“Para demostrar que todo su secreto reside, como hemos dicho, en la tapa armónica, Torres construyó una guitarra de cartón, a excepción claro, de la plantilla, que era de pinabete. Esta guitarra tiene un sonido extraordinario, aunque un poco hueco, ablandado y grave, como lo pudo comprobar el autor de este Diccionario, pulsándola en casa de Tárrega.”

Prat (1934).

“Después construyó la de cartón; de sonoridad extraordinaria; ...jamás quiso venderlas.”

*Carta del padre Juan Martínez Sirvent a Fco. Rodríguez Torres (1931)*⁷¹

Él nunca quiso vender ese instrumento en vida y fue luego de su muerte que pasa a manos de Francisco Tárrega, luego a Miguel Llobet y finalmente fue adquirida por el Museu de Música de Barcelona donde se encuentra actualmente en exposición. Es por esa razón que nos contactamos con Joan Pellisa por información y nos contactó con Manel Barcons Carbonell quien nos documentó con varios materiales entre los cuales se encontraba la Tesis de Maestría *La Chitarra Papier Mache’* de Pozzi & Migliorini (2001)⁷².

La descripción que aparece en su ficha técnica⁷³ es la siguiente:

“Es una guitarra de seis cuerdas simples obra de Antonio de Torres Jurado (1817-1892), un lutier originario de Almería que se trasladó a Vera durante su juventud, donde se formó como carpintero y más tarde, ya en Granada, como guitarrero con el constructor José Pernas. Se trasladó a Sevilla, donde estableció su taller para experimentar e innovar en la construcción de guitarras y es considerado como el padre de la guitarra clásica moderna (Romanillos, Winspear, 2004). Esta guitarra en particular es conocida con el nombre de “la guitarra de cartón”, porque el fondo y los aros están hechos de este material. Antonio de Torres seguramente la construyó para demostrar su teoría, según la cual la principal causa de la buena sonoridad de una guitarra es la tapa armónica, que en este caso es extremadamente delgada. La tapa armónica, en forma de ocho, está formada por dos piezas de píce de veta desigual con una decoración muy sencilla a base de filetes de marquetería. La boca está decorada con una media espiga como tema central y está fileteada con círculos de maderas negras, marrones y blancas. El perfil y el puente son de palisandro mientras que el mango y la cabeza son de cedro. El fondo y los aros son de cartón. La pala presenta una chapa de palisandro y tiene clavijas de madera y el diapasón, con dieciocho trastes fijos, también es de palisandro, superpuesto a la tapa, y con trastes de metal incrustados. También incluye un golpeador de arce y toda la superficie está barnizada con goma laca.”

⁷¹ En Romanillos (2020).

⁷² que utilizamos como base para construir una versión de la misma que denominamos SFE14. Puede encontrarse más información en Ray, J.

⁷³ En: https://cataleg.museumusica.bcn.cat/detall/fons_instruments/H309199/?resultsetnav=5ca3a7ccc3036

No se conocen los objetivos del célebre luthier al construirla ya que no existen documentos ni relatos que lo avalen. No obstante, la mayoría de las fuentes⁷⁴ (al parecer basadas en relato de E. Pujol) le atribuyen la intención que se puede leer más arriba “...para demostrar su teoría, según la cual la principal causa de la buena sonoridad de una guitarra es la tapa armónica,...”.

Sin embargo, se trata de una construcción muy particular:

- La tapa del instrumento es extremadamente delgada con un espesor mínimo de 0,5 mm según Romanillos (2020) o bien en el rango (dependiendo de la zona) de 0,7 a 1,5 mm según Pozzi & Migliorini (2001).
- El diseño del abanico armónico es único y diferente al que su creador usó tanto antes como después.
- El brazo parece ser reutilizado de otro instrumento (tiene una perforación cónica tapada como si hubiese pertenecido a una guitarra de 7 cuerdas).

Todo lo anterior, unido a que nunca quiso ser vendida, apoya la idea tanto de Joan Pellisa (2017-2, 2017-3) y Stefano Grondona de que se trata de un instrumento experimental, una búsqueda de Torres.

En palabras de Stefano Grondona⁷⁵:

“...preferimos imaginar a un constructor de instrumentos que, más allá del ámbito de la experimentación técnica, se complace en demostrar, más como un desafío para sí mismo que para el asombro de los demás que puede extraer sonido de un material más bajo que la madera, y tal vez al probar que su arte es casi capaz de trascender el material.

...pudimos probar el instrumento, no sin cierta emoción. Fue realmente asombroso descubrir que tiene una calidad cantabile que no es inferior en ningún sentido a la de los otros instrumentos de Torres que conocemos. Sólo cuando uno se hace cargo de este aspecto fundamental es posible pensar en cuestiones de detalle, y quizás atribuir al cartón cierta afinidad acústica con guitarras de maderas más ligeras, como el ciprés; pero debe recordarse que, especialmente en el caso de Torres, tales diferencias en el material (y en el sonido resultante) son secundarias a la identidad musical predominante del instrumento.”

Puede escucharse en Cumpiano *Notes...* la *Danza Española N° 5* de Granados ejecutada en forma impecable por Stefano Grondona en la guitarra FE14 restaurada. También en http://finefretted.org/html/stefano_grondona.html (CD#1 pista 8).

Este particular experimento no fue el primero ni el único. Prat (1934) cita en su Diccionario a “*RICHTER, C.-Luthier que en el año 1808 estaba establecido en Herrnhut. Construyó artísticas guitarras en papier mâché. Los ejecutantes las encontraban excelentes, por la gran cantidad de voz.*”. Hoy día existen varios luthiers que han imitado la idea⁷⁶.

⁷⁴ ver Hofmeister (1954), Evans (1977) y Romanillos (2020).

⁷⁵ Extracto de Grondona, S. & Waldner, L. (2001) *The Cardboard Guitar* from *La Chitarra di Liuteria/Masterpieces of Guitarmaking*, L'officina del libro accesible en Cumpiano *Notes...*

⁷⁶ ver por ejemplo https://www.youtube.com/watch?v=_elx2OvWN58, <https://www.youtube.com/watch?v=7dR0PdrLf3g>, https://issuu.com/orfeomagazine/docs/orfeo_12_es (a partir de pág. 26), https://issuu.com/orfeomagazine/docs/orfeo_19_es (a partir de pág. 38).

3

Guía para la construcción de dos prototipos de guitarra española

A continuación, se enumeran y describen mediante fotografías los pasos seguidos para montar un par de prototipos de guitarras clásicas de acuerdo al método Torres. Posteriormente se las analizará para comparar sus respuestas desde el punto de vista de la acústica musical.

Ambos instrumentos fueron concebidos con ese objetivo por lo cual varios de sus componentes, pero por sobre todas las cosas sus tapas armónicas son (en la medida de lo posible) idénticas. Para ello se las obtuvo a partir del laminado de una misma tabla de *Douglas fir*⁷⁷ (*Pseudotsuga menziesii*).

A continuación, se enumeran las características y materiales que comparten:

1. material y espesores de la tapa
2. material y diseño del abanico armónico
3. material y diseño gral. de barras armónicas, refuerzos de boca y barra de refuerzo bajo el diapasón
4. plantilla (forma) de tapa y fondo
5. volumen de la caja,
6. diámetro de la boca,
7. diseño, dimensiones y material del puente
8. diseño, dimensiones y material del diapasón,
9. trastes,
10. modelo de clavijero.

⁷⁷ Se eligió esta especie, conocida como *Pino Abeto norteamericano*, de acuerdo a los estudios que realizara el guitarrista, historiador de la guitarra e investigador español-argentino Ricardo Muñoz Santizo a partir de la década de 1940 (Muñoz, 2015): concluyó que esta madera (aunque muy por detrás del *Alerce* preferido por dicho autor) tendría propiedades para considerarla *madera de resonancia*. Además de ello la misma se consigue habitualmente en los negocios madereros de nuestro país a precios accesibles.

La SFE14: Guitarra inspirada en la FE14 (1862) “la guitarra de *papier mâché*” (papel maché) o “de cartón” de Antonio de Torres Jurado

Construimos nuestra versión inspirada en la FE14 que llamamos SFE14. Se trata de un prototipo (una guitarra experimental) construido según el método español o Torres.

Las maderas empleadas en ella fueron Douglas Fir (*Pseudotsuga menziesii*), Arce (*Acer*), Cedro Rosa (*Cedrela odorata*), Sapeli (*Entandrophragma cylindricum*) y Muiracatiara (*Astronium lecointei*).

a- Tapa armónica

Enrasado y encolado de mitades para conformar la tapa (dos piezas pareadas en Douglas fir). Corte del perfil de la tapa.

Calibrado de la tapa: espesor del orden de los 2,1 mm y valores menores en la zona periférica del puente y del lóbulo mayor. Lijado.



Figura 3.1 (a) Mitades pareadas en Douglas fir (b) Piezas encoladas y contorno de tapa

Rebaje del canal en la tapa para incrustar la roseta (o embocadura).

Incrustado y encolado de la roseta en su canal de la tapa. Rebaje de la roseta hasta el nivel de la tapa. Lijado.

Apertura de la boca. Lijado.

Encolado de varetas del abanico armónico (en Douglas fir) a la tapa: abanico armónico de disposición en cometa tipo Torres de 7 varetas cerradas por otras 2 en "V". Este procedimiento se puede hacer en el sistema de prensado *Gobar* presionando las varetas del abanico armónico contra un molde cóncavo para definir el domo del lóbulo mayor de la tapa. En este caso se usó la solera con su concavidad para tal fin.



Figura 3.2. Tapa con roseta incrustada (izq.). Varetas del abanico encolándose en el Gobar (der. arriba). Detalle del varetaje de tapa (der. abajo).

Tallado del abanico armónico. Lijado.

Corte, tallado de la curvatura (para acompañar abombamiento de la tapa) y encolado de las barras armónicas (en Douglas fir) a la tapa superior e inferior más otra de refuerzo bajo el diapasón. Tallado de barras armónicas. Lijado. Corte y encolado de las láminas de refuerzo de boca (en Douglas fir). Tallado. Lijado.

b- Brazo

En el caso particular de este instrumento el brazo no se construyó: tal como se hizo con la FE14 original fue reciclado a partir del brazo de otra guitarra de desecho (el mástil y

cabeza estaban cortados a partir de una única pieza). El aspecto original del mismo se puede apreciar en la foto:

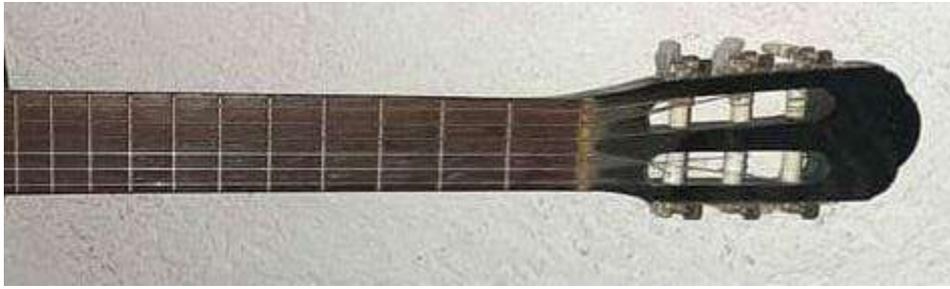


Figura 3.3. Brazo a reciclar

El mismo fue despintado, se le quitó el diapasón original (dañado y de madera de baja calidad), se le reconstruyó un pie de zoque (en Cedro rosa) a partir de su extremo inferior⁷⁸, se lo lijó y se le dio terminación a gomalaca. Los canales para las cuerdas tenían rampas en media caña.



Figura 3.4. Cabeza despintada, lijada (izq.) y acabado pulido francés (der.).

Corte de ranuras en el zoque para insertar los aros y las cuñas (según Romanillos).

⁷⁸ Esto se debió a que el brazo original estaba diseñado de acuerdo al método de construcción (similar al utilizado en la construcción de violines) en el cual se hace la caja de la guitarra, el brazo y luego se montan ambos ensamblándolos en "cola de Milano"; en este tipo de encastre una pieza "macho" tipo *ducktail* (cola de pato) ubicada en el extremo inferior del brazo se introduce en una abertura "hembra" de forma complementaria practicada en un taco ubicado en el extremo superior interno de la caja.

Tallado del zoque.
Rebaje de la base del mástil en la zona de encolado de la tapa.
Aplicación del acabado: lustre francés (gomalaca aplicada a muñequilla) al zoque exceptuando los canales para cuñas y las zonas de encolado de tapa y fondo.



Figura 3.5. Detalle del brazo despintado, lijado y con zoque incorporado.

c- Encolado de tapa y brazo



Figura 3.6. Brazo reciclado (con acabado lustre francés) encolado a la tapa.

d- Aros y culata

Corte de los aros (en Cartón gris).

Se muestran junto a dos tiras de contrachapado (en Eucalipto) usadas para facilitar el enchapado de los mismos.

Domado de aros.

Corte y encolado de la lámina de madera (en Sapeli de 0,5 mm) para enchapado exterior de los aros (para protección del Cartón gris).

Corte de la culata (en Cedro rosa).

Corte de los extremos de los aros para ajustarlos a las ranuras del zoque y para que sus extremos inferiores enrasen entre sí al encontrarse en la culata.

Preparación y encolado del contra aro (o contrafaja) (en Cedro rosa) estriado de fondo a los aros.



Figura 3.7. Aros de cartón gris (izq.) y contra aros estriados en proceso (der.).



Figura 3.8. Contra aros terminados (izq.) y encolándose a los aros de cartón (der.).

e- Encolado del conjunto tapa y brazo a los aros y culata

Inserción y encolado de aros en las ranuras del zoque conjuntamente con las cuñas (según Romanillos) (en Cedro rosa). Encolado de aros a la tapa. Encolado de la culata a los aros. (Este procedimiento se hace en base a la solera, un útil que sirve de molde al conjunto).



Figura 3.9. Detalle de aros en ranuras del zoque (izq.). Encolado de culata a los aros (izq.).

Corte y encolado de varillas de refuerzo de aros (en Douglas fir) y peones de las barras armónicas (en Cedro rosa).



Figura 3.10. Montaje de tapa y brazo a los aros sobre la solera.

Corte de peones (en Cedro rosa).

Encolado de peones para unión de tapa y aros.

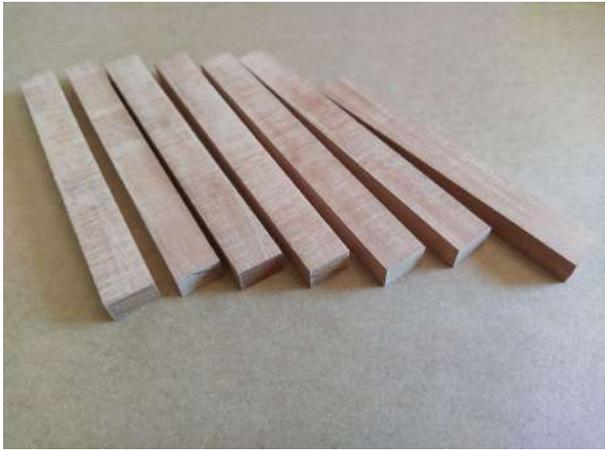


Figura 3.11. Varillas para peones (izq.) y peones ya cortados (der.).



Figura 3.12. Detalle de encolado de peones a tapa y aros.

f- Fondo

Corte del fondo (en Cartón gris).

Encolado de la lámina de madera (en Sapeli de 0,5 mm) para enchapado exterior (para protección del Cartón gris).

Corte para definir el perfil del fondo.

Corte y encolado del tapajuntas y las varillas diagonales de refuerzo del fondo al fondo (en Pino).

Corte, tallado de curvatura y encolado de las barras de refuerzo del fondo al fondo (en Cedro). Tallado. Lijado.

Encolado de la etiqueta del artesano al fondo.

Corte y encolado de los peones de las barras de refuerzo de fondo (en Cedro rosa) a los aros. Lijado.

Ajuste del nivel del contra aro de fondo para el encuentro con el fondo.



Figura 3.13. Fondo con varillas diagonales, tapajuntas, barras de refuerzo y etiqueta.

g- Encolado del fondo al resto del instrumento

h- Colocación de terminaciones, acabado y ajustes finales

Ruteado de canales para cenefas (en Arce) simples sin filete.

Domado y encolado de cenefas.

Rebaje y lijado de cenefas. Corte y encolado de tapa de talón (en Caoba) de zoque.



Figura 3.14. Detalle del borde de la tapa enrasado a los aros (izq. arriba) y con la cenefa encolada en el canal realizado previamente con router (izq. abajo). Tapa de talón (der.).

Corte y rectificado del diapasón (en Muiracatiara).

Ranurado de canales para insertar los trastes.

Encolado del diapasón al mástil.

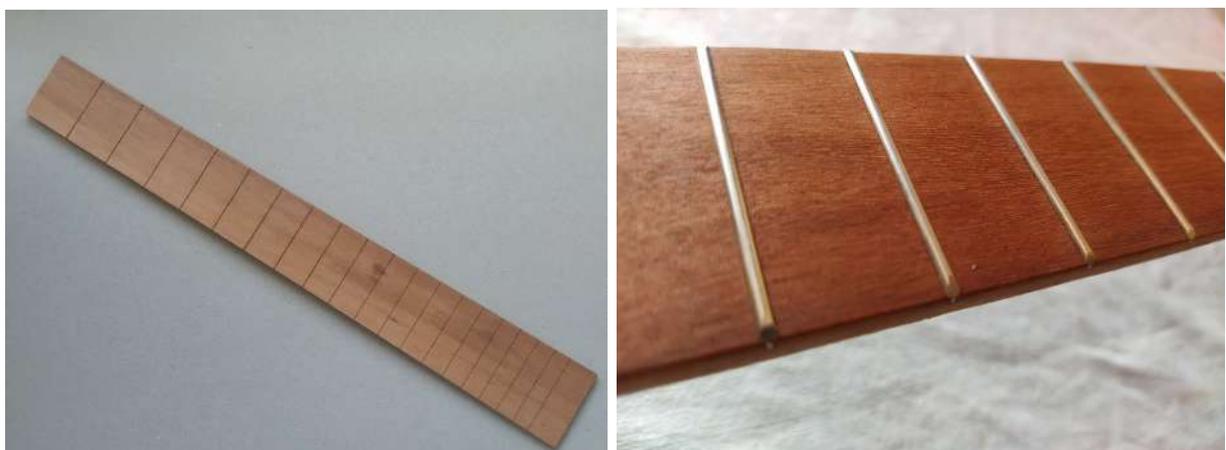


Figura 3.15. Diapasón ranurado (izq.) y ya entrastado (der.).

Entrastado del diapasón.

Lijado general del instrumento.

Enmascarado de zonas a proteger del acabado (interior, diapasón, área de encolado del puente). Aplicación del acabado: lustre francés (gomalaca aplicada a muñequilla).



Figura 3.16. Instrumento en etapas de lijado (arriba) y acabado pulido francés (abajo).

Corte, tallado, perforado y lijado del puente (en Muiracatiara). Aplicación del acabado al puente.



Figura 3.17. Ranurado de canales del puente (izq.) y cortes iniciales (der.).



Figura 3.18. Etapas de tallado (izq.) y acabado del puente (der.).

Encolado del puente a la tapa.

Corte y ajuste de ceja y cejuela (en hueso).

Instalación del clavijero tipo "lira" con perno grueso.

Acabado en pulido francés Open pore con gomalaca común.

Para el encolado de todas las piezas se utilizó resina alifática (código "TB rojo")

Encordado del instrumento (encordado "carbón" código D EJ45FF).

Ajustes finales.



Figura 3.19. Guitarra terminada (frente).



Figura 3.20. Detalle de la cabeza y el clavijero.



Figura 3.21. Detalle de aros, tapa y talón (izq.) y aros, talón y fondo (der.).



Figura 3.22. Detalle de tapa, cenefa y aros (izq.) y puente (der.).

Dimensiones de la guitarra SFE14

lóbulo mayor (o inferior): 36,9 cm

lóbulo menor (o superior): 28,4 cm

longitud del cuerpo: 48,4 cm

cintura: 24,0 cm

Área de la tapa: 1.383 cm²

ancho (medio) de aros: 9,0 cm

diámetro de boca: 8,3 cm

tiro de cuerdas: 650 mm (+1 mm aprox. de compensación)

Peso: 1,807 Kg

La GSFE14: Guitarra gemela de la SFE14

La GSFE14 es un prototipo (una guitarra experimental) construido según el método español o Torres.

Las maderas empleadas fueron Douglas Fir, Arce, Cedro Rosa/Cedro americano, Sapeli, Muiracatiara, Eucaliptus (*Eucalyptus*) y Pino (*Pinus*).

a- Tapa armónica

Enrasado y encolado de mitades para conformar la tapa (dos piezas pareadas⁷⁹ en Douglas fir). Corte del perfil de la tapa.

Calibrado de la tapa: espesor del orden de los 2,1 mm y valores menores en la zona periférica del puente y del lóbulo mayor. Lijado.

Rebaje del canal en la tapa para incrustar la roseta (o embocadura).



Figura 3.23. Tapa en Douglas fir.

Incrustado y encolado de la roseta en su canal de la tapa. Rebaje de la roseta hasta el nivel de la tapa. Lijado.

Apertura de la boca. Lijado.

Encolado de varetas del abanico armónico (Douglas fir) a la tapa: abanico armónico de disposición en cometa tipo Torres de 7 varetas cerradas por otras 2 en "V". Este

⁷⁹ Pertencientes a la misma porción de tabla de la cual se conformó la tapa de la SFE14.

procedimiento se puede hacer en el sistema de prensado *Gobar* presionando las varetas del abanico armónico contra un molde cóncavo para definir el domo del lóbulo mayor de la tapa. En este caso se usó la solera con su concavidad para tal fin.



Figura 3.24. Encolado de varetas del abanico a la tapa en Gobar sobre solera.

Corte, tallado de la curvatura (para acompañar el abombamiento de la tapa) y encolado de las barras armónicas (en Douglas fir) a la tapa: superior e inferior más otra de refuerzo bajo el diapasón. Tallado de barras armónicas. Lijado.

Corte y encolado de las láminas de refuerzo de boca (en Douglas fir). Tallado. Lijado.



Figura 3.25. Encolado de barras armónicas a la tapa (izq.), tapa con varetaje sin terminar (centro) y tapa con roseta incrustada (der.).

b- Brazo

Corte y encolado de piezas del zoque (en Cedro rosa).

Corte y calibrado de cabeza (montada a partir de 4 piezas en Cedro rosa) y mástil (en Cedro rosa). Encolado de la cabeza al mástil.

Encolado del cubrecabeza (o cubrepala) (en Sapeli de 1,0 mm) y adorno bajo el cubrecabeza (en Guatambú de 0,6 mm).

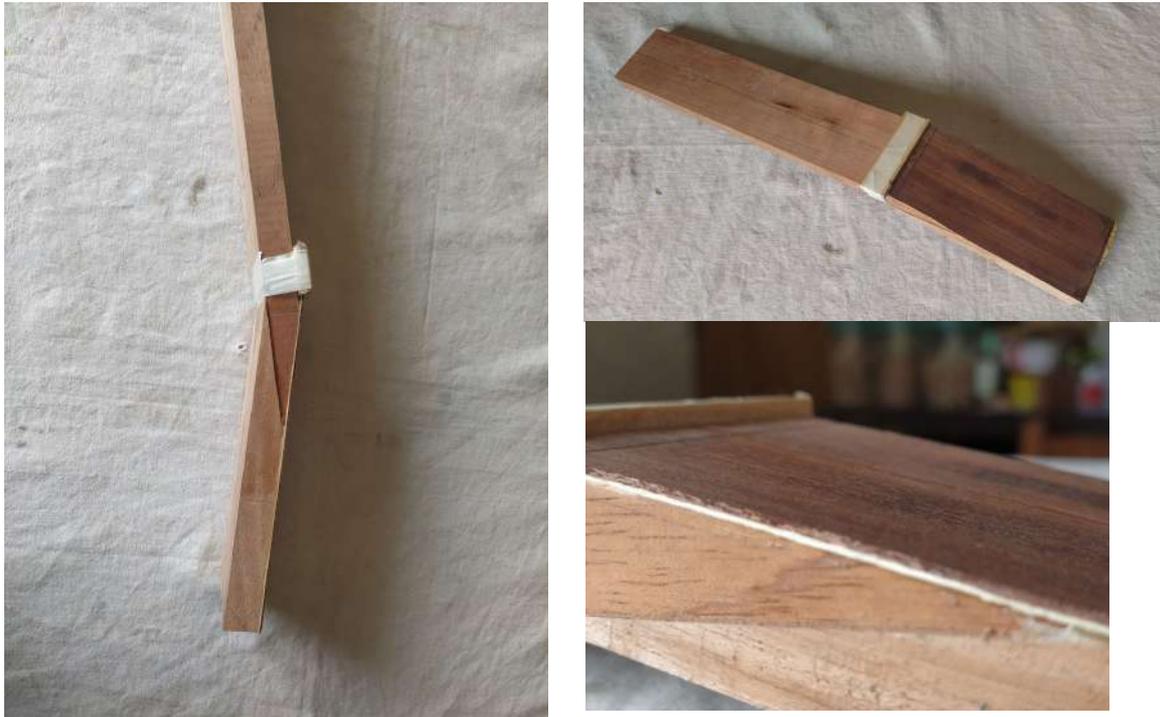


Figura 3.26. Encolado de cabeza al mástil de perfil (izq.), vista frontal (der. arriba) y detalle de versión de cubre cabeza (der. abajo).

Cortes para dimensionado y perfilado del contorno de la cabeza (tipo Torres).

Cabeza: calado de los dos canales para las cuerdas (con rampas en cuadrado) y perforación de orificios para los pernos del clavijero. Lijado.



Figura 3.27. Plano de perfil de cabeza Torres (izq.) y pieza terminada (der.).

Encolado de zoque al mástil (a este conjunto le llamaremos *brazo*)

Cortes laterales para dimensionado del mástil.

Corte de ranuras en el zoque para insertar los aros y las cuñas (según Romanillos) (en Cedro rosa).

Tallado del zoque: a su porción externa le llamamos talón (o quilla) y a la interna pie.
Lijado.

Rebaje de la base del mástil en la zona de encolado de la tapa.

Aplicación del acabado: lustre francés (gomalaca aplicada a muñequilla) al zoque exceptuando los canales para cuñas y las zonas de encolado de tapa y fondo.

c- Encolado de tapa y brazo



Figura 3.28. Detalle de zoque (izq.) y tapa encolada al brazo (der.).

d- Aros y culata

Corte de la culata (o taco base) (en Cedro rosa). Ajuste para el encuentro de su borde superior con la tapa. Lijado.

Corte y calibrado de aros (en contrachapado de Eucaliptus 3 mm enchapado en Sapeli 0,5 mm). Domado de aros. Corte de los extremos de los aros para ajustarlos a las ranuras del zoque y para que sus extremos inferiores engrasen entre sí al encontrarse en la culata.



Figura 3.29. Aros domados prensados a los moldes (izq.) y prontos (der.).

e- Encolado del conjunto tapa y brazo a los aros y culata

Preparación y encolado del contra aro (o contrafaja) estriado (en Cedro rosa) de tapa y fondo a los aros. Ajuste para el encuentro con la tapa. Encolado del conjunto tapa y brazo a los aros y culata. Corte y encolado de los peones de las barras armónicas (en Cedro rosa) contra los aros. Lijado. Aplicación del acabado: lustre francés (gomalaca aplicada a muñequilla) al interior de los aros y contra aros.

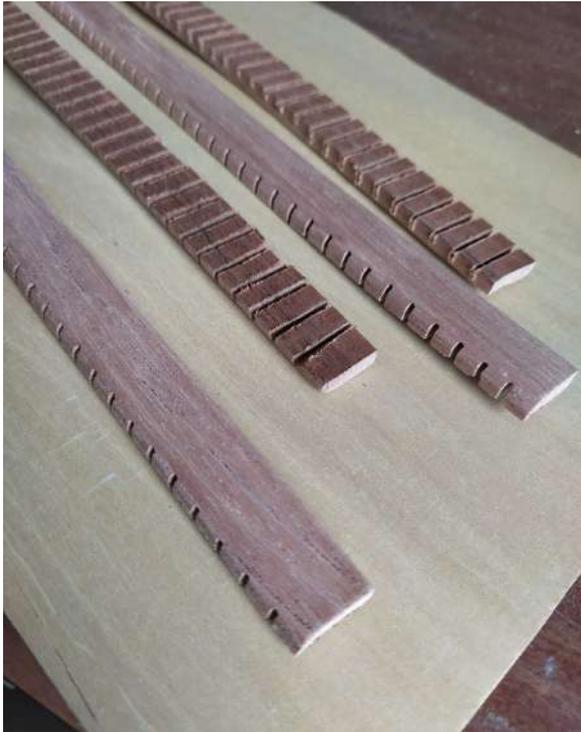


Figura 3.30. Contra aros (izq.) y encolándose a los aros (der.).



Figura 3.31. Montaje de tapa, aros y culata sobre solera.

f- Fondo

Corte para definir el perfil del fondo (en contrachapado de Eucaliptus 3 mm enchapado en Sapeli 0,5 mm).

Corte y encolado del tapajuntas (o refuerzo del fondo) (en Pino) al fondo. Tallado. Lijado.

Corte, tallado de curvatura y encolado de las barras de refuerzo del fondo (en Cedro rosa) al fondo. Tallado. Lijado.



Figura 3.32. Fondo de frente (izq.), tapajuntas y barras de refuerzo en bruto (centro) y barras de refuerzo en proceso de tallado (der.).

Corte y encolado de los peones de las barras de refuerzo de fondo (en Cedro rosa) a los aros. Lijado.

Encolado de etiqueta del artesano al fondo.

Ajuste del nivel del contra aro de fondo para el encuentro con el fondo.

g- Encolado del fondo al resto del instrumento

h- Colocación de terminaciones (cenefas, selleta, etc.), acabado y ajustes finales

Ruteado de canales para cenefas simples (en Arce).

Domado y encolado de cenefas.



Figura 3.33. Detalles de canal para cenefa de tapa (izq.) y fondo (der.).

Rebaje y lijado de cenefas.

Corte y encolado de la tapa del talón (en Cedro rosa).



Figura 3.34. Detalle de tapa de talón en bruto y encolado de cenefa del fondo.

Calado del canal para incrustar la selleta (pieza contra la cual se encuentran los extremos inferiores de los aros) (en Arce).

Encolado de la selleta.

Corte y rectificación del diapasón (en Muiracatiara). Ranurado de canales para insertar los trastes. Encolado del diapasón al mástil. Entrastado del diapasón.

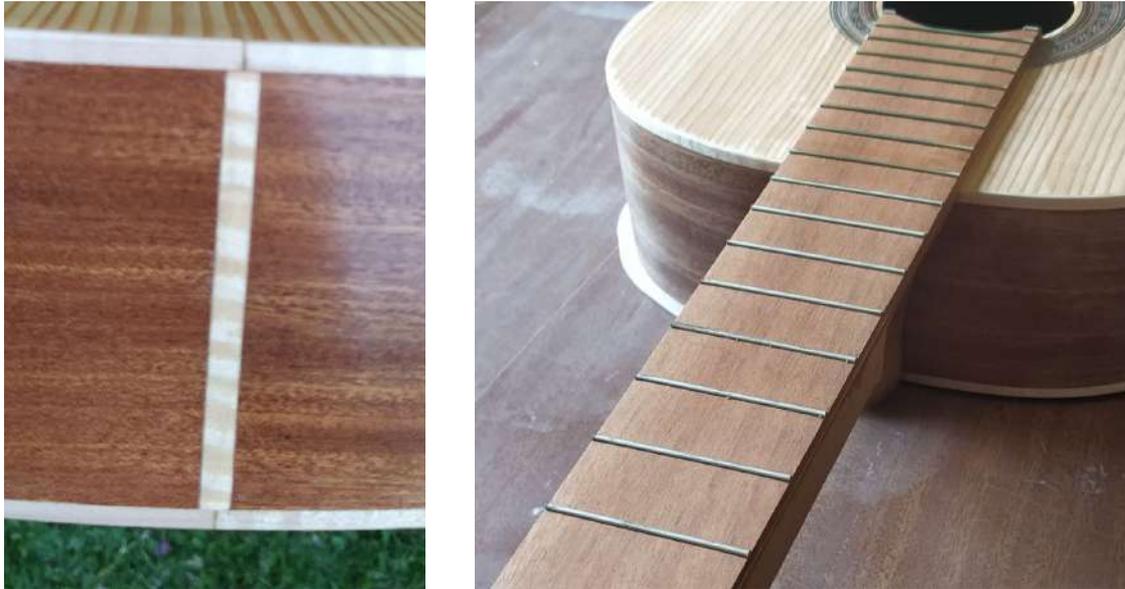


Figura 3.35. Selleta (izq.) y entrastado del diapasón (der.).

Tallado de la curvatura de la cara posterior del mástil

Lijado general del instrumento.

Enmascarado de zonas a proteger del acabado (interior, diapasón, área de encolado del puente).

Aplicación del acabado: lustre francés (gomalaca aplicada a muñequilla).

Corte, tallado, perforado y lijado del puente. Aplicación del acabado al puente.



Figura 3.36. Puente en tres etapas de elaboración.

Encolado del puente a la tapa.

Corte y ajuste de ceja y cejuela (en hueso).

Instalación del clavijero tipo "lira" con perno grueso.

Acabado en pulido francés Open pore con gomalaca transparente.

Para el encolado de todas las piezas se utilizó resina alifática (código "TB rojo")

Encordado del instrumento (encordado "carbón" código D EJ45FF).

Ajustes finales.



Figura 3.37. Guitarra terminada (frente).



Figura 3.38. Detalle de cabeza.



Figura 3.39. Detalle de fondo y aros (izq.) y tapa (der.).

Dimensiones de la guitarra GSFE14

ídem SFE14

Peso: 1,749 Kg

Evaluando las guitarras SFE14 y GSFE14

En esta sección compartimos las evaluaciones, realizadas por músicos de trayectoria de nuestro medio, de las guitarras “gemelas”⁸⁰ SFE14 y GSFE14.

Antes de ello hemos seleccionado textos que apuntan a reseñar de forma sucinta las biografías de los especialistas que generosamente se prestaron a realizar la evaluación solicitada, así como enlaces en los cuales pueden escuchar una muestra de sus respectivos trabajos.

Reseñas biográficas de los evaluadores

Ramiro Agriel

Ramiro AGRIEL GALLETTO, nacido en San Carlos, comienza estudios de guitarra y solfeo en 1962, con el profesor José Luis PLADA [en el departamento de Maldonado]. En 1968 ofrece su primer concierto, a partir del cual mantiene una gran actividad como intérprete en Montevideo y en el interior del país. Durante los años 1969-70, continúa estudios con el Prof. Pantaleón DAVEZAC, en la ciudad de Rocha.

En 1971, recibe una beca para tomar clases con el Maestro Abel CARLEVARO, en Montevideo. En el año 1972, ingresa al Conservatorio Universitario de Música, donde continúa estudios con el mencionado Maestro. En 1976, participa del concurso de selección de Juventudes Musicales del Uruguay, obteniendo Categoría A. En 1978, es seleccionado, en Concurso de Selección, organizado por AEMUS.

Durante los años 1977 y 78, realiza cursos de Análisis Musical, con el Maestro Héctor TOSAR. En 1978, participa en el IV Seminario Internacional de Guitarra, dirigido por el Maestro Abel CARLEVARO. En 1979 egresa del Conservatorio Universitario de Música, obteniendo la Licenciatura en Interpretación Musical (Guitarra). En el mismo año, asiste al curso «La música en el siglo XX», organizado por el Instituto Goethe. Desde 1980, ocupa el cargo de Ayudante de Cátedra del Maestro Abel CARLEVARO, en el CUM. En 1983, participa en el «Concurso Internacional de Guitarra, Dr. Luis SEGALL», realizado en Viña del Mar (Chile), como representante del Uruguay, seleccionado por la Comisión Organizadora de dicho evento. En el mismo año, participa en los cursos «La enseñanza del piano, según el Método Gainza» y «Técnicas modernas de lecto-escritura musical», que dictara en Montevideo, la profesora V. HEMS Y de GAINZA.

En 1985, integra el «Grupo Independiente de Música», actuando como solista. Ese año asiste al curso ‘La interpretación de la música de los siglos XVII y XVIII’, dictado por el clavecinista M.T. CHENLO. Desde 1985, integra el «Cuarteto de Cámara», junto a S. BLANCO (violín), J. QUÍNTELA (flautas) y C. LEVTN (violoncello), con el que se ha presentado en diversas salas de la Capital y del Interior.

En 1986, es premiado en concurso de AEMUS y la Embajada de España. En el mismo año, realiza el curso «La armonía del siglo XX», dictado por el Profesor A. MASTROGIOVANNI. En 1987, obtiene el 2º Premio, en el «Concurso Internacional de Guitarra», del Maestro Abel CARLEVARO. En el mismo año, realiza un curso de guitarra dictado por Betho DAVEZAC. Participa como invitado especial en la «Agrupación Camarística Guido SANTÓRSOLA» de Santa Fe (Argentina), con la que realiza conciertos en Montevideo y en el Interior del país.

⁸⁰ O, en forma más correcta, “hermanas” ya que cualquier luthier sabe que es imposible repetir siquiera una parte del instrumento en forma idéntica a otra: cada pieza de madera es única.



Figura 3.40. De izquierda a derecha, Daniel Baccino, Ramiro Agriel, y Guzmán Trinidad, quien sostiene la SFE14.

En 1989, realiza un curso sobre «Música Barroca», con Eduardo FERNÁNDEZ y en 1990 y 1991, asiste a un Seminario de Guitarra, dirigido por Álvaro PIERRI. En 1991, asiste a un cursillo sobre «Lo teórico en el curso de instrumento», a cargo de M. MAROZZI. Desde 1990, se desempeña como Encargado de la Cátedra de Guitarra, de la Escuela Universitaria de Música, y a partir de 1991, como Profesor de la Escuela Municipal de Guitarra, de Fray Bentos. En 1994, asiste al cursillo sobre «Renacimiento y Barroco en la Guitarra», dictado por el Profesor Betho DAVEZAC, y al Seminario «Arreglos de Tangos para Guitarra», a cargo del Maestro Agustín CARLEVARO. En 1995, realiza una serie de conciertos en España y en Italia, donde además integra el Jurado de un Concurso Internacional en Pisa (Italia). En 1996, realiza un seminario, con el compositor contemporáneo, el cubano Leo BROUWER.

Desde 1997 integra el dúo «Promenades» junto a la flautista Florencia ROMERO con quien se ha presentado en numerosas salas de Montevideo y el interior. En el año 2000 el dúo fue premiado en un concurso organizado por la Fundación L. Tróccoli. Desde 2002 es invitado a participar del Trío de Guitarras «Gandhara» con O. Leite y E. Tarduña con quienes han realizado conciertos en Montevideo, salas del interior y Hong Kong.

Es co-partícipe del disco “Manos para la Guitarra” del compositor uruguayo Lucio Muniz, grabación del año 2007. Ha editado los libros: «34 Canciones para principiantes de guitarra» (2007), «Compositores uruguayos para guitarra» (2009) y “Canciones escolares de E. Fabini para dos guitarras” (2010). Ha sido jurado de concursos nacionales e internacionales.

La reseña biográfica se tomó del documento: *Concierto de guitarra del Maestro Ramiro Agriel junto al Coro Santa Cecilia este domingo en el Uamá*. Carmelo Portal (2017) <https://www.carmeloportal.com/26373-concierto-de-guitarra-del-maestro-ramiro-agriel-junto-al-coro-santa-cecilia-este-domingo-en-el-uama>

Un joven Ramiro Agriel ejecutando su guitarra durante todo el programa: Escande, A. *La guitarra y sus intérpretes - Programa N° 23 - Ramiro Agriel* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=jvMSdSFdCMA&feature=youtu.be>

Juan Frache

Juan Daniel Frache es un carmelitano profesor de Música egresado del IPA. Compositor, cantautor, actor. Ha sido director de la Escuela de Educación Artística de Carmelo (Colonia) y al momento de escribir estas líneas es Inspector Regionalizado de Educación Artística de la DGEIP.



3.41. Con Juan Frache, quien sostiene la guitarra SFE14 luego de ejecutarla en la conferencia “Resonancias simpáticas ...” (Teatro Uamá, Carmelo, setiembre de 2022).

Intentamos acercar aquí algunos ejemplos recientes de sus diversas facetas profesionales. En 2017 su proyecto *Cornucopia* resultó ganador del Fondo Regional para la

Cultura del MEC. *Cornucopia pone en escena fragmentos de una historia familiar difusa y con piezas faltantes, a través de los recuerdos dispersos de los personajes. Estos fragmentos, apuntan a un origen genealógico misterioso y una relación con paisajes y escenarios evocados por una madre anciana y enferma, aún desconocidos para los hijos adultos y para la muchacha extranjera que la cuida como su propia familia.*⁸¹

Su faceta actoral puede explorarse también en el corto *Barriletes de azar* (Compasdúo, 2021), un corto al que se puede acceder en YouTube⁸²; así como su condición de músico e intérprete, por ejemplo en *Viejos Anhelos*.⁸³

Ha musicalizado recientemente el documental *El tiempo robado* (Krismanich, 2019), producido por el Grupo por memoria, verdad y justicia de Carmelo. Fue parte de la 9a. Muestra Documental de Cine DDHH. En el sitio Agenda cultural (IM)⁸⁴ se lo describe: *Documental / Testimonial. En el Uruguay del 73, el golpe cívico militar aisló a muchas familias carmelitanas de sus seres queridos por más de diez años, la ausencia, la soledad, el dolor y la espera interminable golpeó duramente a quienes estaban del otro lado de la ruta... Estos son los relatos testimoniales de algunos familiares que vivieron la invasión de sus hogares, los plantones, el exilio, la ausencia de sus seres queridos, esa lenta y angustiante espera de visitas escasas de tiempo... donde irónicamente el tiempo tristemente era lo que sobraba...*

Juan ha tenido la generosidad de ejecutar obras propias en la “guitarra de cartón” (SFE14) al comienzo y al final de la Conferencia *Resonancias simpáticas ...* en el marco del Encuentro de APFU (Carmelo, setiembre de 2022), en la que presentamos un avance de este trabajo. Compartimos [un video casero en el que registramos a Juan](#) en el cierre de la conferencia.

Rubén Olivera

Nace el 20 de octubre de 1954 en Montevideo, compositor, guitarrista, cantante, docente, investigador, comunicador vinculado a la música y a la cultura. Empezó a estudiar guitarra a los 9 años, a los 16 cursó un año en el Núcleo de Educación Musical, Nemus, que dirigía Daniel Viglietti y en 1972 se muda a Buenos Aires, donde siguió sus estudios de guitarra, canto, armonía y arreglos musicales sobre formas folclóricas rioplatenses. De regreso en Uruguay en 1978, estudió con Coriún Aharonián y Graciela Paraskevaídis. Perteneció a la llamada generación del '78 junto a otros colegas como Leo Masliah, Fernando Cabrera y Mauricio Ubal, con quien compuso en 1979 la canción “A Redoblar”, que se convirtió en un himno de la resistencia contra la dictadura uruguaya. Rubén Olivera tiene un hermano desaparecido, milita activamente por los Derechos Humanos y es miembro de Madres y Familiares de Uruguayos Detenidos Desaparecidos.

⁸¹ Sala Verdi, temporada 2019.

<https://salaverdi.montevideo.gub.uy/memoria-teatral/temporada-2019-nelly-antunez/cornucopia>

⁸² Compasdúo - Barriletes de Azar (Video Oficial), <https://youtu.be/eTu0GAnnc5E>

⁸³ Juan Frache - Viejos Anhelos // Autores Locales Carmelo [Video]. YouTube. <https://youtu.be/pBnoOwWBeUc>

⁸⁴ <https://montevideo.gub.uy/ciudad-y-cultura/agenda-cultural/9a-muestra-documental-de-cine-ddhh-0>



Figura 3.42. Con Rubén Olivera y la SFE14.

En 1981 edita su primer disco solista “Pájaros”. En 1987, 1992 y 1995 ofrece ciclos de recitales junto a Mauricio Ubal. Ha colaborado con artículos escritos sobre música, cultura y derechos humanos en diversas publicaciones y realiza programas de investigación y documentación musical en radio y televisión. Es docente de música desde 1978. Desde 1979 es miembro de Ediciones Discográficas Ayuí/Tacuabé. Es cofundador del TUMP (Taller Uruguayo de Música Popular).

Estuvo al frente de dos programas emitidos por TV Ciudad, uno de ellos ganador del premio Tabaré 2000 al Mejor Programa Televisivo de Difusión Cultural. En 2006 se incorpora a Emisora del Sur con su programa de radio “Sonidos y silencios”, que también obtuvo el premio Tabaré 2006 al Mejor Programa Radial de Difusión Cultural.

Se ha presentado en escenarios de Colombia, Brasil, Argentina, Suecia, Alemania, Bélgica, Cuba y Paraguay y sus canciones han sido versionadas por Pepe Guerra, Fernando Cabrera, Jorge Drexler y Liliana Herrero entre otros.

El texto completo puede leerse en: *Historia de la música popular uruguaya Rubén Olivera*. (s. f.). <https://www.historiadelausicapopularuruguaya.com/artista/ruben-olivera/>

La fuente siguiente permite visionar la ejecución de la canción que le da nombre a su disco *Interiores: RUBÉN OLIVERA “Interiores” - Autores en Vivo - Ciclo 3* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=1ofpdkgOMAc&feature=youtu.be>

Fredy Pérez

No hay muchos músicos en Uruguay que hagan lo que está haciendo Fredy Pérez. Tanto por su repertorio como por el modo en que lo interpreta, ocupa un lugar poco concurrido en la actualidad. Fredy selecciona temas de la tradición musical popular rioplatense —milongas, estilos, tonadas,

tangos; algunos conocidos, aunque la mayoría bastante oscuros— y los versiona de un modo muy personal e íntimo que requiere una escucha atenta e introspectiva.



Figura 3.43. Con Fredy Pérez digitando un acorde sobre la SFE14.

Fredy nació en 1961 en —de todos los lugares— Tacuarembó; a los seis o siete años ya cantaba por radio en programas mañaneros de música folclórica. Empezó a tocar la guitarra de modo autodidacta y estudió luego con docentes como Severo Núñez, Ricardo Rodríguez Cruz y Luis Pintado; de a poco la guitarra le fue ganando espacio al canto. En 1986 se radicó en Montevideo, tomó clases con Abel Carlevaro, Jorge Lazaroff, Horacio Olivera y Esteban Klísich, entre otros. A la tradición de la canción campera le fue agregando el elemento urbano y tanguero. Integró el Cuarteto Zitarrosa y acompañó en la guitarra a cantantes como Malena Muyala, Ana Prada y Mabel Hopenhaym. En 2012 editó, por el sello Ayuí, un álbum solista: *Me gusta lo desaparejo*.

El texto anterior puede leerse completo en: *La música de Fredy Pérez*. Sotobosque 2020. <https://www.sotobosque.uy/post/la-musica-de-fredy-perez>

Puede verse una muestra del trabajo de Fredy en: *Fredy Pérez en vivo Teatro Florencio Sánchez*. [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=Ny_WDxt_UB0&feature=youtu.be

Daniel “Pollo” Píriz

Compositor, músico, docente y tallerista, Daniel "Pollo" Píriz nace en Minas el 8 de agosto de 1960. Comienza sus estudios de guitarra con René Larrosa y Ulises Peña. Luego estudia composición en el Conservatorio Universitario de Música de Montevideo y Armonía con Alberto Magnone.

Como compositor tiene editados *Los granaderos bailan a la luz de la luna* (Orfeo); *Pedrito Malasartes* (Ayuí); *Gaia* (Perro Andaluz); *Comerse una Manzana* (Perro Andaluz); *Bicho de luz* (Perro Andaluz)

Ha participado como instrumentista y/o productor en *They'll never make a gaucho out of me*, de The Rejects; *Comadres*, de Berta Pereira y las Comadres; *Tamudando*, de Luis Bravo y *Las voces de la tierra*, de grupo Choñik.

Ha realizado la ambientación sonora para teatro: Miss Mártir (Premio Florencio a Mejor Espectáculo); Don Juan ó la orgía de piedra, Teatro Circular, 1990; All that tango, Teatro de Anglo 1998; ¿Dónde estaba Ud. el 27 de junio de 1973?, Alianza Francesa; Luces de Bohemia, Teatro del Picadero, 1993; La Celestina, Teatro Anglo, 1994; Cuartos de luna, Polizonteatro; UBÚ rey, Polizonteatro; y los videos Vida rápida, del grupo Hacedor y Matrimonio asaltado, de Luis Varela, entre otros.



Figura 3.44. Con Berta Pereira, quien sostiene a la GSFE14, y Daniel “Pollo” Píriz con la SFE14.

El texto anterior se ha extraído del perfil Facebook del músico: <https://www.facebook.com/Pollo-P%C3%ADriz-107082442876/>

Un video con matices autobiográficos: *CIFRA - Berta Pereira & Pollo Piriz.mov* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=uL1Q0mGr34Y&feature=youtu.be>

Reseñas comparativas de ambas guitarras

Opinión sobre la guitarra experimental SFE14

En este instrumento sobre réplica de Antonio Torres hay dos características que se destacan nítidamente. La primera es una claridad de sonido no frecuente y la otra un gran volumen muy llamativo. Además permite la realización de vibratos y una rica gama tímbrica. Es de esperar que este modelo realizado con maderas más ideales, potencie las características antes expuestas.

Comparativo SFE14 y GSFE14⁸⁵

Del estudio comparativo de ambas guitarras se deja constancia que: a) no se observan diferencias notorias en cuanto a volumen y color del sonido. b) es muy notoria en guitarra 2 la brillantez del sonido y la mayor capacidad vibratoria. Tiene mayor riqueza en armónicos que guitarra 1. Hay que tener en cuenta que guitarra 2 fue construida a posteriori que guitarra 1 por lo que seguramente tiene menos uso, lo cual genera gran expectativa con respecto a su crecimiento con mayor tiempo de trabajo.

Lic. Ramiro Agriel

Reseña de la SFE14

Experiencia con la guitarra de cartón versión del modelo “Torres” por Guzmán Trinidad

Reseño en este espacio brevemente algunas ideas y sensaciones asociadas a la experiencia de conocer y tocar en la guitarra construida por el profesor y luthier Guzmán Trinidad.

En cuanto a los aspectos sonoros se destaca una presencia importante de las frecuencias agudas del campo armónico que se evidencian tanto en el ataque de los sonidos como en el “sustain” o tiempo de decaimiento. En ambos aspectos la respuesta fue muy buena, permitiendo el destaque preciso de los aspectos melódicos y el juego con los armónicos naturales del instrumento para crear un ambiente acústico envolvente.

En cuanto a lo morfológico se presenta un instrumento cómodo, de fácil dominio, lo que permite el despliegue de recursos técnicos y mecánicos variados de manera fluida. Si bien por el modelo (al cual no estoy acostumbrado) el espesor del mástil desequilibra levemente el balance del peso con respecto al cuerpo, éste aspecto no es relevante puesto que la dimensión general del instrumento posibilita un fácil dominio del mismo.

En cuanto a la relación estético-acústica de las piezas ejecutadas, creo que (más allá de la interpretación) el resultado fue sumamente satisfactorio, permitiendo resaltar las fortalezas y posibilidades expresivas de un instrumento de calidad que cumple ampliamente con las expectativas de creadores, intérprete y público.

Juan Frache.

⁸⁵ El músico las llama “guitarra 1” y “guitarra 2” en la reseña.

Reseña de la SFE14

Toqué con ella y es increíble el sonido que tiene considerando los materiales con los cuales está construida y también parece fascinante que se pueda hacer un instrumento en base a ellos.

Cuando me piden que evalúe y opine sobre una guitarra me cuesta encontrar cómo hacerlo ya que no soy idóneo en el tema luthería, sumado a que es un hecho muy subjetivo la valoración de aspectos del sonido. Además uno está acostumbrado a su guitarra. Para mí es un poco brillante con respecto a lo que me gusta. Hay detalles vinculados a la comodidad para tocar que también son personales ya que refieren al tipo de pulsación de cada uno, concretamente siento altas las cuerdas en relación al brazo. Pero ese es un detalle circunstancial. La escucho muy afinada, o sea, los trastes están muy bien medidos. Van mis felicitaciones por la cantidad de aristas que esta experiencia implica (relevamiento histórico, rescate de investigaciones uruguayas, contactos internacionales, experimentos de acústica, etc.).

Siempre recuerdo que en una oportunidad fui a una casa de venta de instrumentos y me vi rodeado por cinco o seis guitarras. Al poder probarlas en un corto lapso, fue muy interesante ver la diversidad de sonidos y texturas que tenían. Uno entonces se da cuenta que tiene que elegir un sonido: cómo lo quiere y para qué lo quiere. Puede ser que alguno prefiera más volumen, otro un sonido más medioso, pero siempre es una decisión estética que depende de lo que se busque.

Rubén Olivera

Síntesis de una charla con **Fredy Pérez** (FP) con un interlocutor (PP) sobre su evaluación de la guitarra “de cartón” (SFE14)
(Transcripción no textual)

FP: Para destacar, lo que escuché yo es que suena mucho, en el buen sentido...

PP: ¿Volumen?

FP: Tiene una sonoridad increíble para afuera. Nunca había tocado en una guitarra que despidiera tanto. Esta guitarra que es buena y sonora [señala su guitarra] no tiene esa exuberancia. No sé si se lo da el mismo material. Me preguntaba cómo bancaba ese cartón, la tensión de una guitarra normal de madera.

PP: Seguramente la estructura soporta.

FP: Por eso me quedé preguntando el otro día ... A la vez es bastante cálida, según como toques. Los agudos que tiene esta guitarra se destacan en relación a la otra, ... se destacan bastante. A su vez no es una guitarra chillona, podría ser brillante “de más” y no lo es.

FP: No debo haber tocado muchas guitarras, porque siempre he tocado las mías. Me impresionó bastante esa sonoridad.

PP: Pensamos en hacer medidas “con micrófono” de las guitarras.

FP: Depende de cómo tire, para mi esa guitarra despide pila.

Opinión sobre la guitarra experimental SFE14⁸⁶

Un domingo, un querido vecino, llega a mi casa con dos guitarras de su factura, para que le diera mis impresiones.

La primera, hermosa, sencilla, con sonido claro, con graves persistentes, agudos de cristal y lindo brazo, cómoda.

Tomando como referencia mi guitarra, muy buena guitarra española, la encontré óptima. Hablamos brevemente de las maderas usadas y otros detalles.

Cuando toco en la segunda guitarra, noto que tiene más graves, una sonoridad general más amplia y agudos tan buenos como la anterior.

La sorpresa de aquella mañana de domingo fue enterarme de qué estaba hecha esta segunda guitarra.

Lo que no fue sorpresa fue confirmar que mi querido vecino es un genio.

Comparativo SFE14 y GSFE14

Esta vez las guitarras aparecieron en un día de cumpleaños, éramos un grupo de músicos sobre ellas.

Nunca pude saber cuál era cuál. Ambas tenían las mismas bondades, sonaban muy bien, sin diferencias relevantes en su sonoridad.

“Pollo” Píriz

⁸⁶ En este caso el músico prueba primero una guitarra de materiales típicos de la construcción española y luego la SFE14.

4

Guía de Actividades Experimentales

Acceso a software y aplicaciones para generar, editar, y analizar sonidos

Dejamos accesos a una lista no exhaustiva de sitios a través de los cuales se puede acceder a software para los sistemas operativos de PC más usuales y aplicaciones para dispositivos móviles (Smartphones y tablets). Además de los datos básicos agregamos un breve comentario extraído de cada uno de ellos. Buena parte de las integrantes de la lista fueron utilizadas en las actividades que siguen.

Advanced Spectrum Analyzer

Czuplejewicz, W. (2017, 4 enero). **Advanced Spectrum Analyzer**. Apps para

Android de Wojciech Czuplejewicz en Google Play. Google Play.

https://play.google.com/store/apps/details?id=com.vuche.asap&hl=es_UY&gl=US

Advanced Spectrum Analyzer es una poderosa herramienta de audio en tiempo real (RTA) para visualizar y analizar señales del micrófono del dispositivo Android en el dominio de la frecuencia.

Audacity

Crook, J. (2022, 5 julio). **Audacity**. Audacity®. <https://www.audacityteam.org/>

Software de audio gratuito, de código abierto y multiplataforma. Audacity es un editor y grabador de audio multipista fácil de usar para Windows, macOS, GNU/Linux y otros sistemas operativos. Audacity es un software gratuito de código abierto.

Online Tone Generator

Gieson, M. (s. f.). **Online Tone Generator**. ToneGen.

<https://www.gieson.com/Library/projects/utilities/tonegen/>

Un simple generador de tonos en línea para señales sinusoidales, cuadradas y diente de sierra, de frecuencias precisas.

Phyphox

Staacks, S. (2016). **Your smartphone is a mobile lab**. Phyphox.

<https://phyphox.org/>

Phyphox le permite utilizar los sensores de su teléfono para sus experimentos. Por ejemplo, detectar la frecuencia de un péndulo usando el acelerómetro o medir el efecto

Doppler usando su micrófono. Exporte sus datos en muchos formatos comunes para analizarlos en su software favorito. Guarde o comparta los datos a través de cualquier aplicación en su teléfono.

Al tiempo de realizar este trabajo, se encuentran varias configuraciones pre guardadas de Acústica, entre ellas: Amplitud de audio, Autocorrelación de audio, Efecto Doppler, Generador de tonos. En todos ellos hay una breve descripción de su funcionamiento, disponible en español.

Physics Toolbox Sensor Suite

Vieyra, A. (2022). **Physics Toolbox Sensor Suite**. Vieyra Software.

https://play.google.com/store/search?q=physics+toolbox+sensor+suite&c=apps&hl=es_UY&gl=US

Esta aplicación utiliza sensores internos de teléfonos inteligentes para recopilar, mostrar, registrar y exportar archivos de datos .csv. Visite www.vieyrasoftware.net para leer sobre el uso de casos en investigación y desarrollo, y obtener planes de lecciones para educadores de los campos de ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas (STEM), incluida la física. La disponibilidad, precisión y exactitud de los sensores dependen del hardware del teléfono inteligente.

Se puede acceder a configuraciones previamente guardadas. En la sección Acústica: Detector de tono, Generador de Tono, Analizador de Espectro, Espectrograma, entre otros.

Sonic Visualiser

Cannam, C., Landone, C., & Sandler, M. (2010). **Sonic Visualiser**. Sonic Visualiser.

<https://www.sonicvisualiser.org/>

Sonic Visualiser es una aplicación gratuita de código abierto para Windows, Linux y Mac, diseñada para ser el primer programa al que recurre cuando quieras estudiar de cerca una grabación de música. Está diseñado para musicólogos, archivistas, investigadores de procesamiento de señales y cualquier otra persona que busque una manera amigable de ver lo que hay dentro del archivo de audio.

Tune!It Lite

Volkmer, D. (2021, 21 septiembre). **Tune!It Lite** - Apps en Google Play. Tune!It Lite.

https://play.google.com/store/apps/details?id=com.tuneit.tuneitlite&hl=es_UY&gl=US

Tune!It Lite es una versión básica del programa profesional de afinación de instrumentos musicales Tune!It. Le permite afinar sus instrumentos de manera fácil y precisa al mostrar la nota, la frecuencia y la desviación en cents. Puede seleccionar entre afinación cromática automática o afinaciones personalizadas para guitarra, bajo, ukelele, violín, viola, violonchelo y gaita.

Visual Analyser⁸⁷

Accattatis, A. (2021). *Visual Analyser* - <https://www.sillanumsoft.org/>

“Visual Analyser es un completo software profesional en tiempo real, transforma tu PC en un conjunto completo de instrumentos de medición; no se necesita hardware nuevo (puede usar la tarjeta de sonido de su PC) o puede usar un hardware externo específico (consulte la sección Hardware para ver un ejemplo). Visual Analyzer se ejecuta en Windows 9x, ME, 2k, XP, NT, Server, Vista, 7,8/10. La versión de Visual Analyzer 2021 R1 ya está disponible (para plataforma de 64 y 32 bits), ya no es compatible con Windows 9x. La versión 2011-2012 se ejecuta en Linux mediante la utilidad Wine.”

⁸⁷ Un ejemplo de aplicación de esta herramienta por parte del ingeniero y luthier inglés Trevor Gore (<https://goreguitars.com.au/>, coautor del libro *Contemporary Acoustic Guitar Design and Build*) puede encontrarse en <https://www.youtube.com/watch?v=QQQkvGyCUAE>.

Nota acerca de las actividades experimentales

Las actividades que se presentan a continuación fueron diseñadas eligiendo dispositivos y sistemas tanto de generación como de adquisición de audio (hardware y software/aplicaciones) de calidad comercial y de uso libre, con el objetivo de que pudieran ser ampliamente replicadas por cualquiera que estuviera interesado en ello. Las conclusiones que se extrajeron son compatibles con estas decisiones previas y con los instrumentos particulares (diapasones y guitarras, por ejemplo) utilizados en cada caso. Para generalizarlas deberían aplicarse a un universo más amplio de instrumentos y llevarse adelante una cantidad mucho mayor de medidas.

01 - Oscilaciones de columnas de aire en tubo abierto-abierto: frecuencia en función del largo del tubo

¿Se puede tocar una melodía con tubos y chancletas?

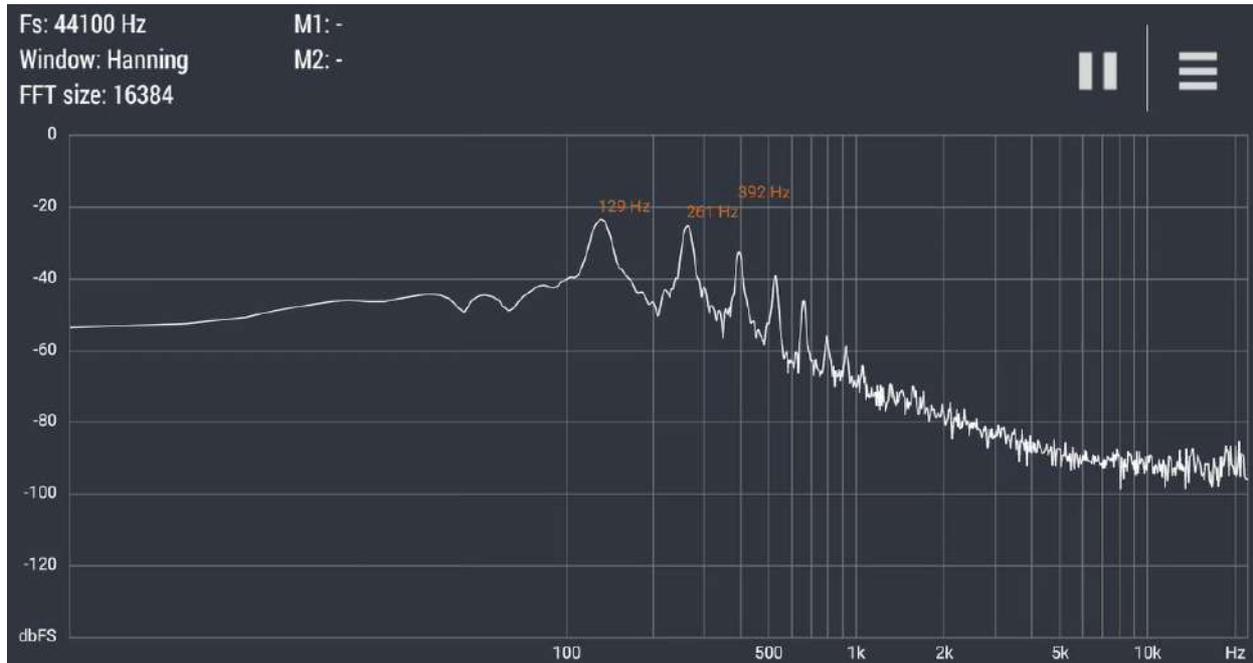
Averiguaremos si la columna de aire en el interior de un tubo abierto por ambos extremos al ser percutido en uno de ellos emite sonido. Para ello cortaremos diferentes longitudes de tubos de PVC disponibles en plaza para instalaciones eléctricas o sanitarias. Percutimos con la mano u otro objeto flexible como una chancleta (u ojota de playa) para luego estudiar el sonido emitido. El instrumento de medida de la frecuencia será un Smartphone ejecutando la aplicación *Advanced Spectrum Analyzer PRO*.

La figura 4.1(a) muestra la captura de pantalla con el plano armónico del sonido de un tubo y en (b) se presenta el gráfico de frecuencia fundamental en función de la longitud de diferentes tubos. Puede observarse en 4.1(a) que se excitaron varios parciales siendo los tres más importantes múltiplos del fundamental por lo cual se emite un sonido musical de acuerdo a la predicción teórica (ec. 18).

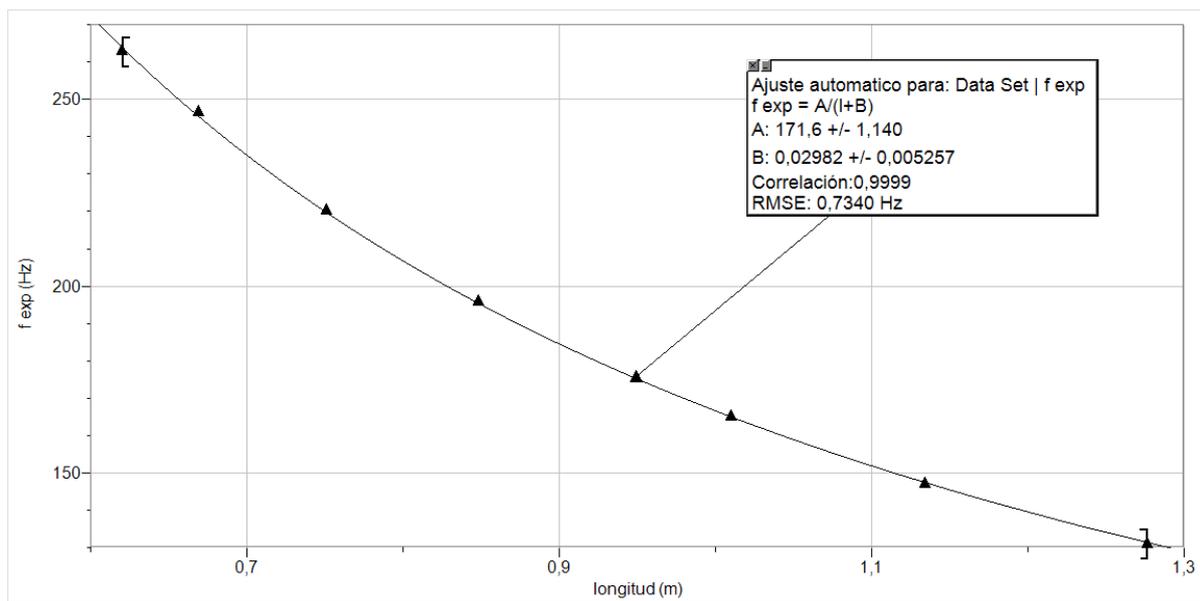
Para construir nuestro instrumento musical al cual se le ha llamado *chancletófono* o *tubófono* cortamos tubos de diferentes longitudes (figura 4.2), medimos la frecuencia fundamental del sonido que emiten al percutirlos por su extremo y los resultados se resumen en la gráfica de *frecuencia en función de la longitud del tubo* adjunta (Figura 4.1-b).

El ajuste es el esperado ya que la dependencia es inversa y los coeficientes son compatibles con la velocidad de sonido en el aire, la desviación de la frecuencia esperada por pérdidas en las paredes y la corrección de longitud por efecto de pestaña en ambos extremos abiertos (Echegarri, 2019).

Con ayuda de esta información podríamos cortar un juego de tubos de longitudes adecuadas de tal forma que cada uno de ellos emita una de las notas de cierta escala musical.



(a) Plano armónico del sonido emitido por un tubo.



(b) Gráfico Frecuencia del modo fundamental en función de la longitud de diferentes tubos.

Figura 4.1. Tubo abierto en ambos extremos.



Figura 4.2. Tubos para construir un chancletófono.

Nota: Si se corta alguna pieza y emite una frecuencia mayor a la esperada puede corregirse (afinarla) agregando una “manga” de cartón, papel o plástico que deslice sobre el extremo inferior del tubo de forma tal que alargue la longitud hasta lograr el objetivo.

También hay que tener en cuenta para el diseño que la frecuencia emitida depende de la velocidad del sonido en el aire la cual varía con la temperatura ambiente.

02 - Oscilación de la barra libre-libre: frecuencia en función de la longitud (modo 1)

¿Puede un trozo de planchuela de hierro (como el utilizado para hacer rejas) emitir un sonido musical?

Utilizaremos un material muy común y corriente como el citado para saber si podemos hacer música con él. Lo primero que deberíamos hacer es montarlo de la forma más libre posible, percutirlo y analizar el sonido en su plano armónico (nivel de sonido en función de la frecuencia). Para ello montaremos un trozo del material de sección transversal uniforme mediante bandas elásticas (figura 4.3), lo percutimos con maza o baqueta de madera cerca de uno de sus extremos y analizaremos el sonido resultante.

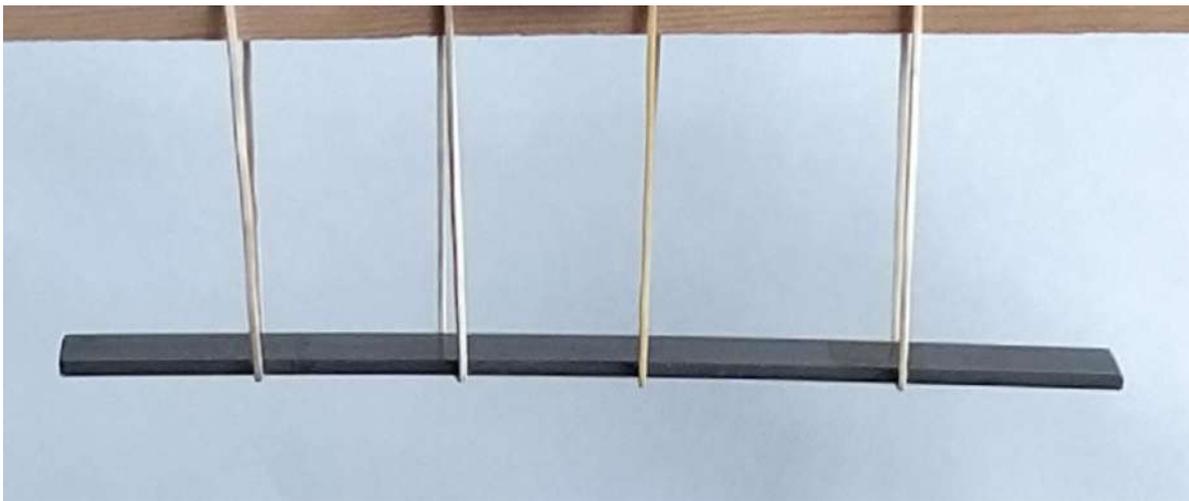


Figura 4.3. Planchuela de hierro colgando mediante bandas elásticas.

Una forma muy práctica de hacer lo anterior es medir con *Advanced Spectrum Analyzer PRO*. Los resultados se muestran en la figura 4.4.

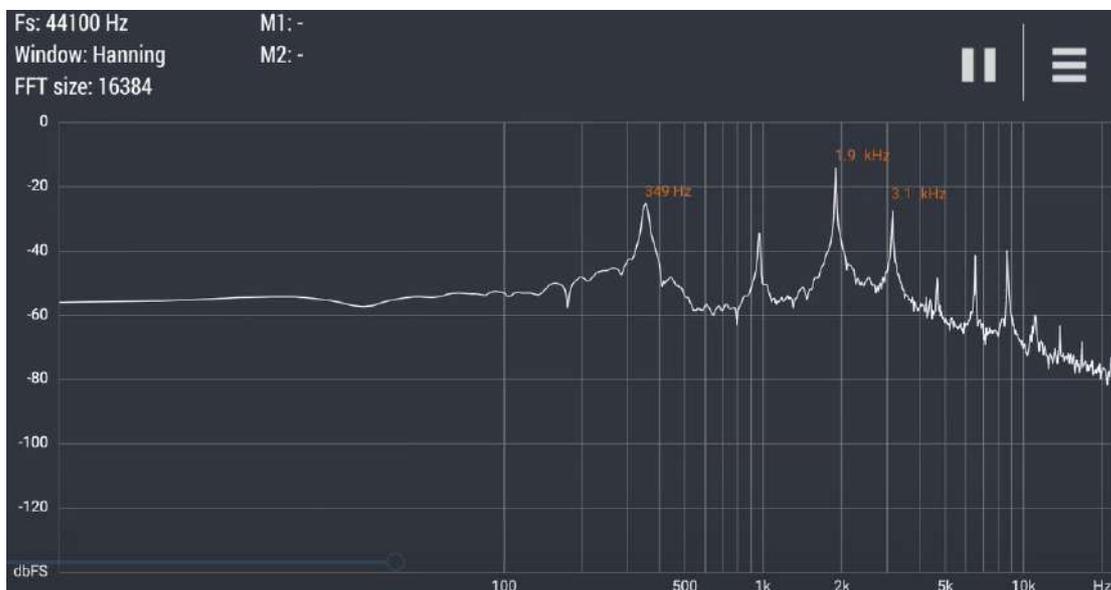


Figura 4.4. Plano armónico del sonido emitido por una planchuela luego de ser percutida.

Podemos ver que se emiten varias frecuencias las cuales (puede demostrarse que) no guardan una relación armónica entre sí (es decir que no son múltiplos de la fundamental f_1). Esto verifica la predicción teórica confirmando que la barra de hierro (y todo sólido) constituye un medio dispersivo para las ondas transversales (la velocidad de propagación de las mismas no es constante, sino que depende de la frecuencia). Sin embargo, los máximos medidos son compatibles con las frecuencias de los primeros cuatro parciales del modelo que describe las oscilaciones de la barra libre-libre (ver ec. 21 y tabla 1.1):

$$f_1, 2.756f_1, 5.404f_1, 8.933f_1$$

¿Entonces la respuesta a nuestra pregunta inicial es negativa?

En principio sí. Pero afortunadamente podemos sortear el problema porque cada frecuencia corresponde a un modo estacionario de oscilación de la barra y cada uno de ellos tiene nodos en posiciones diferentes [figura 1.9(derecha)]: si apoyamos la misma en las posiciones donde existan nodos para un modo particular (por ejemplo, el fundamental) este podrá excitarse, pero los demás se amortiguarán (ya que allí deberían poder oscilar y nuestros apoyos se lo impiden). Con este truco conseguiremos hacer música con nuestras planchuelas. Para ello apoyaremos una de ellas en dos trozos de goma cortados en forma de cuña triangular (con un vértice hacia arriba) a una distancia de $0.224L$ y $0.776L$ (fracciones de su longitud L), lo que se muestra en la figura 4.5.



Figura 4.5. Montaje de la planchuela mediante dos trozos de goma ubicados en los nodos del modo fundamental.

La gráfica de la figura 4.6, generada con la aplicación *Advanced Spectrum Analyzer PRO*, muestra el plano armónico del sonido emitido.

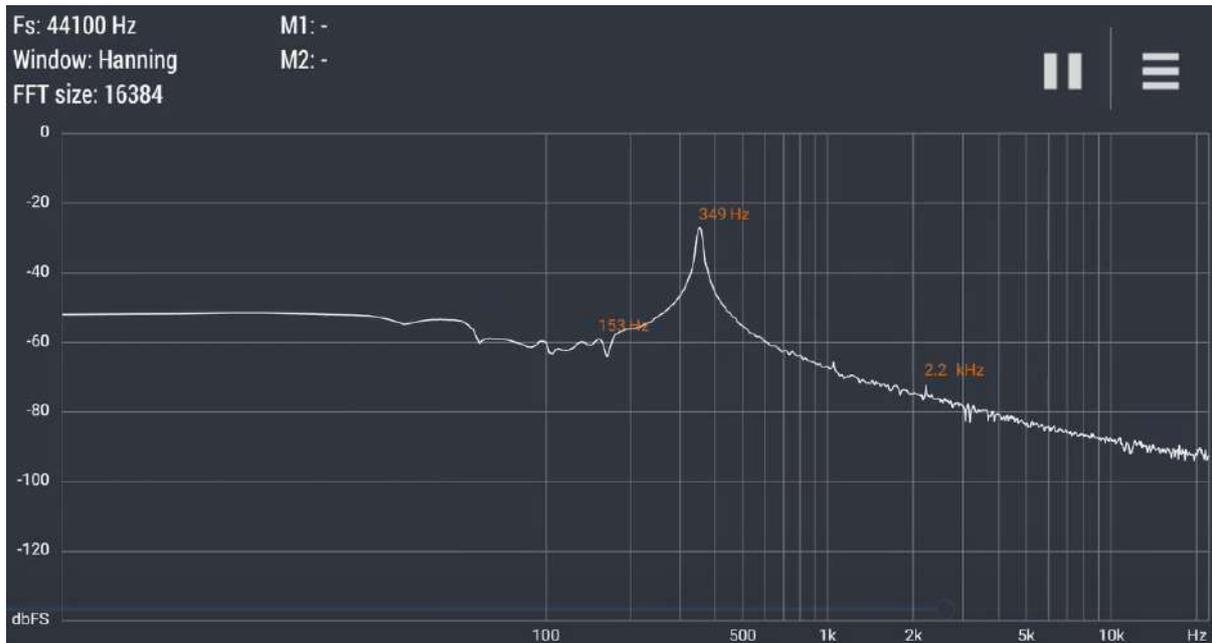


Figura 4.6. Plano armónico del sonido emitido por la planchuela con el segundo montaje.

Para encontrar la dependencia entre la *frecuencia* y la *longitud* cortamos varias muestras y medimos su emisión. A continuación, se resumen los resultados en la gráfica de *frecuencia en función de la longitud* (figura 4.7)

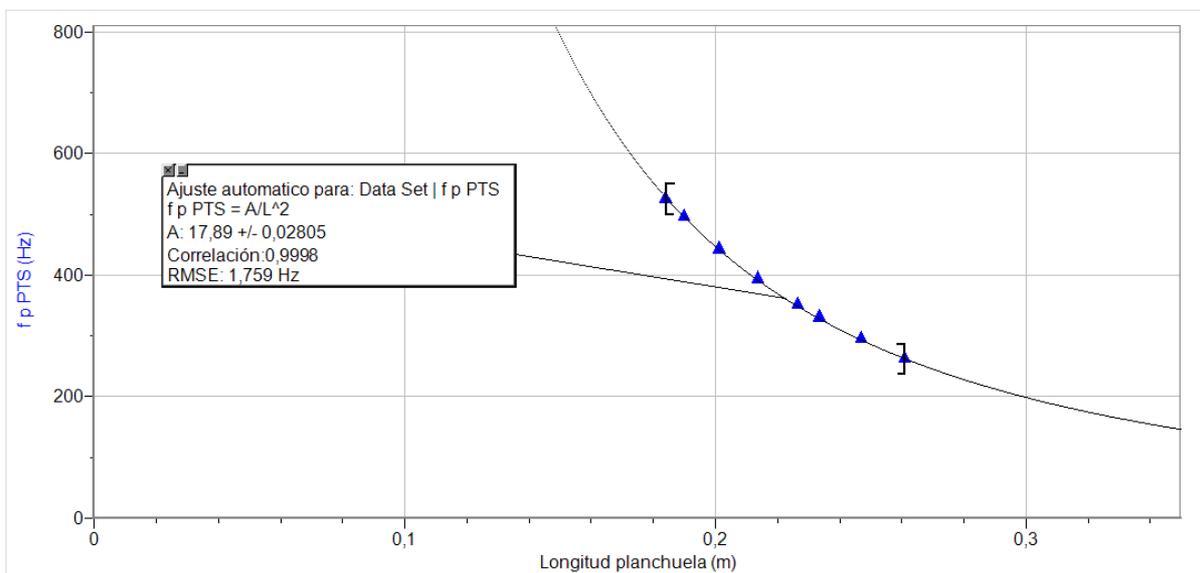


Figura 4.7. Valores experimentales de la frecuencia en función del largo de la planchuela, con un ajuste de forma cuadrática inversa.

Puede confirmarse la predicción teórica (ecuación 21) según la cual el ajuste entre las variables graficadas es el indicado: *frecuencia inversamente proporcional al cuadrado de la longitud*. Con ayuda de esta información podríamos cortar un juego de planchuelas de longitudes adecuadas de tal forma que cada una de ellas emita una de las notas de cierta escala musical.

Nota: si se corta alguna pieza y emite una frecuencia mayor a la esperada puede corregirse (afinarla) mediante un imán de pequeño tamaño y masa que se desplace algo desde la posición del nodo hasta lograr el objetivo.

03 - Detección y registro de las oscilaciones de un diapasón

¿Qué clase de movimiento tiene un objeto que emite sonido? ¿Podemos tener evidencia de que se encuentra en movimiento? ¿Puede registrarse de alguna forma?

Vamos a describir algunas observaciones que nos permitirán evidenciar que las ramas de un diapasón oscilan cuando está emitiendo sonido.

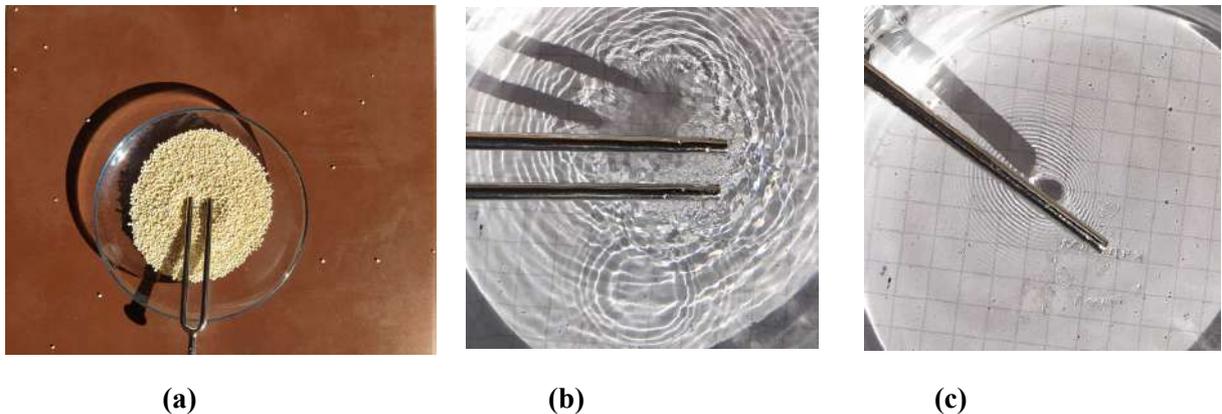


Figura 4.8. Muestra la vibración de un diapasón. Mediante (a) un recipiente con semillas, (b) y (c) la superficie libre de un líquido.

Podemos lograr nuestro objetivo de las más variadas formas. A continuación, se describen algunas:

- Un procedimiento práctico puede ser excitar el diapasón y luego colocar los extremos de sus ramas en un recipiente que tenga objetos pequeños, livianos y no adheridos entre sí como semillas, esferitas de “espumaplast”, etc., las cuales salen despedidas violentamente al contacto (Figura 4.8 a).
- Excitación de la superficie de agua que se encuentre en un recipiente transparente utilizando un papel renglonado o cuadrulado bajo el mismo; Si se toca el agua con los extremos de las ramas se pueden observar salpicaduras y el movimiento como se muestra (Figura 4.8 b).
- Si se procede como en *b*, pero ahora se pone en contacto una de las ramas disponiendo el cuerpo del diapasón en un plano vertical se podrán observar las ondas que la vibración netamente vertical produce en la superficie del líquido (Figura 4.8 c).
- Si se cuelga mediante dos hilos (péndulo bifilar) una esfera de poca masa (espumaplast, ping-pong, etc.) y se la acerca a un diapasón vibrando la misma saldrá despedida evidenciando la oscilación (Figura 4.9).
- Si se muerde con los molares un trozo de madera (puede usar un lápiz) puede excitarse el diapasón y luego colocar la esfera extremo de su vástago en contacto con el mismo (pruebe de disponerlo en forma perpendicular y coincidente con el eje del trozo de madera): ¡sentirá inmediatamente la vibración!

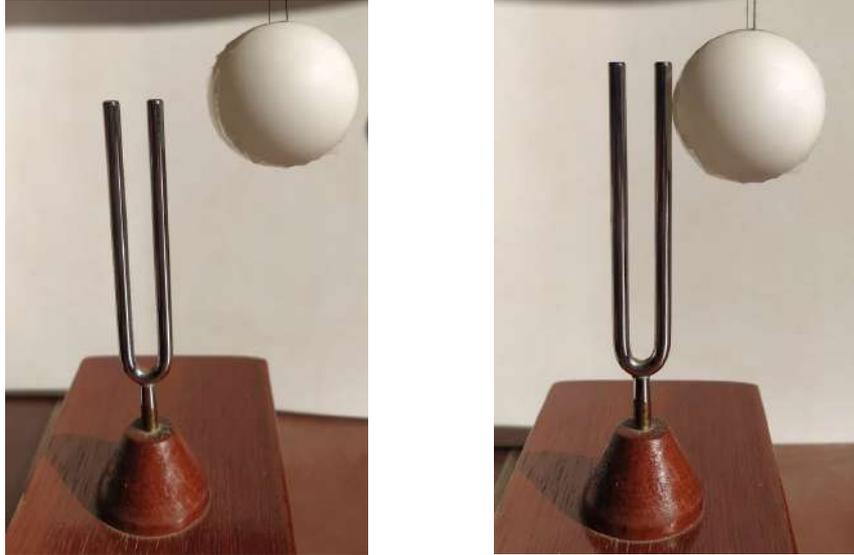


Figura 4.9. Se acerca a un diapasón excitado una pelota de ping-pong sujeta en forma de péndulo bifilar.



Figura 4.10. Se fija un índice al extremo de una de las ramas de un diapasón.

f) Usaremos un método de registro de las oscilaciones muy antiguo. Se trata de generar directamente la impresión de la vibración en una superficie sin producir una amortiguación excesiva. Para ello colocamos en el extremo de una de las ramas del diapasón un “índice” muy agudo y que no tenga oscilación propia apreciable. Para ello usamos un trozo de cuerda de acero (la cuerda 1ra. de una guitarra eléctrica, por ejemplo). Para verificar que se cumple la condición excitamos el diapasón y lo detenemos observando el “índice”: éste debe detenerse sin presentar oscilación detectable.

A continuación, se produce un depósito de “negro humo” sobre una placa de vidrio. En nuestro caso elegimos un portaobjeto de uso habitual en preparados microscópicos y lo pasamos por encima de la llama de una vela. Las fotos de la figura 4.11 muestran el procedimiento y los resultados.

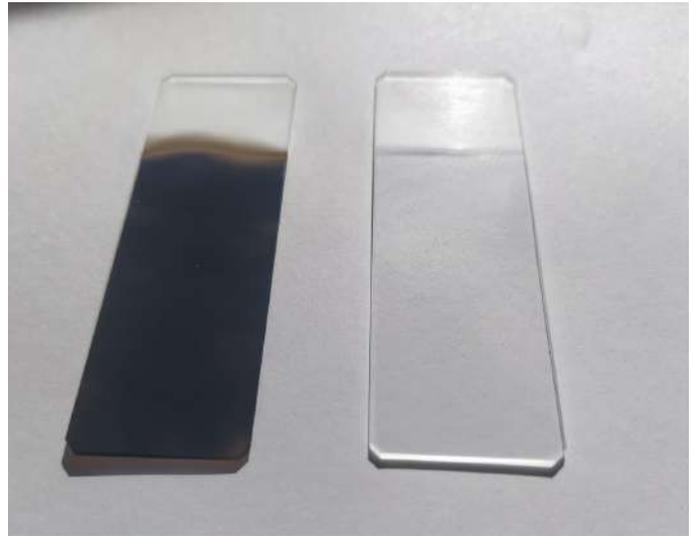


Figura 4.11. Se crea un depósito de “negro humo” sobre una placa de vidrio.

A continuación, se excita el diapasón y se desliza rápidamente el “índice” a lo largo del “vidrio ahumado”. La operación se repite para dejar varios registros. Para fijar el mismo se le puede aplicar un baño de gomalaca. Se muestra un ejemplo del resultado obtenido (figura 4.12).



Figura 4.12. Resultados de deslizar el índice sobre la placa ahumada.

Si se filma el procedimiento de registro (a partir del tiempo y la cantidad de oscilaciones) podría hacerse un cálculo estimativo de la frecuencia de la oscilación del diapasón.

04 - Sonido del diapasón libre suspendido por elásticos (plano armónico)

Si compramos un diapasón de frecuencia nominal 440 Hz y lo excitamos, ¿emite solamente un tono puro de ese único valor de frecuencia?

Para comenzar a responder esa pregunta presentamos esta actividad en la cual se propone medir el sonido que emite un diapasón libre cuando es percutido por una baqueta o maza de madera (figura 4.13 a).



(a)



(b)

Figura 4.13. (a) Baqueta con la que se percute un diapasón colgado (b).

Una vez producida la excitación se analizará el sonido resultante en su plano armónico, es decir, la/s frecuencia/s que forma/n parte del sonido. Se discutirá cualitativamente la tasa de extinción de la frecuencia (o de cada una de ellas y los valores más relevantes).

Nuestro objetivo se enfrenta con un obstáculo inicial: no se puede percutir ni mantener a distancia constante del micrófono que registrará el sonido a un diapasón libre (sin soporte alguno) ya que estaría en caída libre. Es por ello que lo vamos a montar mediante bandas elásticas a soportes rígidos. Se nos ocurre que esta sería la forma más aproximada para lograr nuestros fines. La figura 4.13(b) muestra el dispositivo utilizado. Abajo y a la izquierda en la foto puede observarse el micrófono utilizado para el registro del sonido.

Conectamos el mismo a un Smartphone y ejecutamos la aplicación *Advanced Spectrum Analyzer PRO* grabando la pantalla del celular durante la medición. A partir del vídeo resultante podemos capturar el cuadro correspondiente al instante en el cual el sonido del diapasón ya excitado (esto es luego de que transcurrió la etapa inicial conocida como *transitorio de ataque o attack*) comienza la etapa de *decaimiento o decay* (en la cual el sonido general decae rápidamente desde su máximo hasta el nivel inicial de la etapa de *sustain*).

La figura 4.14 muestra el plano armónico correspondiente (gráfica de nivel de sonido en función de la frecuencia) el cual muestra que se emiten (por lo menos) la frecuencia fundamental (441 Hz) y 6 sobretonos más (aparentemente no armónicos) si consideramos los sonidos por encima de -60 dB. El último se encuentra en el entorno de los 10 kHz. Tal

cantidad de parciales y sus rangos (en frecuencias y nivel de sonido) explican lo que podríamos definir como un “sonido metálico”.

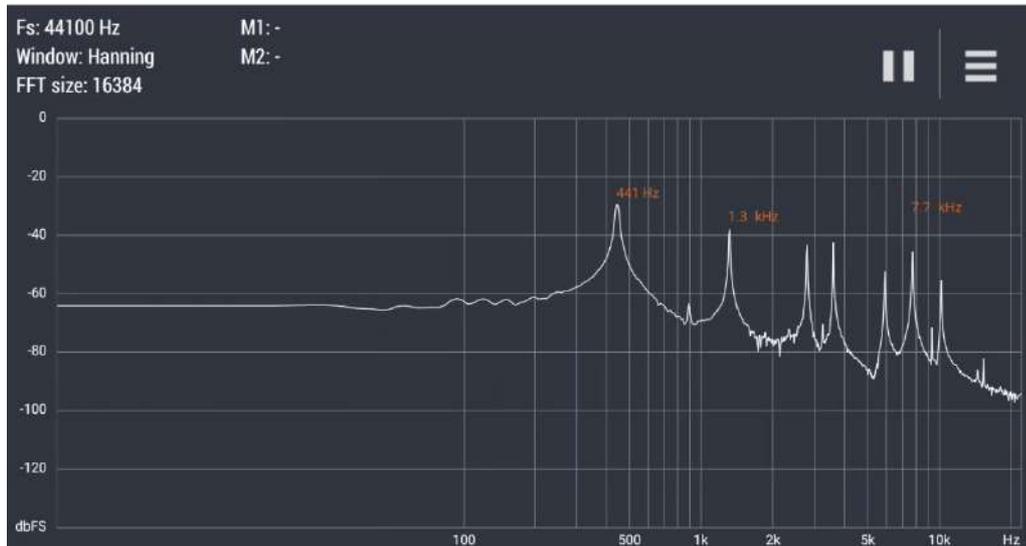


Figura 4.14. Plano armónico del sonido emitido por el diapasón al comienzo del decaimiento.

Entre los valores de frecuencia medidos se pueden identificar (por su *ratio* con la frecuencia del modo fundamental) por lo menos los primeros tres parciales del primer modo simétrico y del primer modo antisimétrico de oscilación del diapasón (Rossing & Rusell 1992).

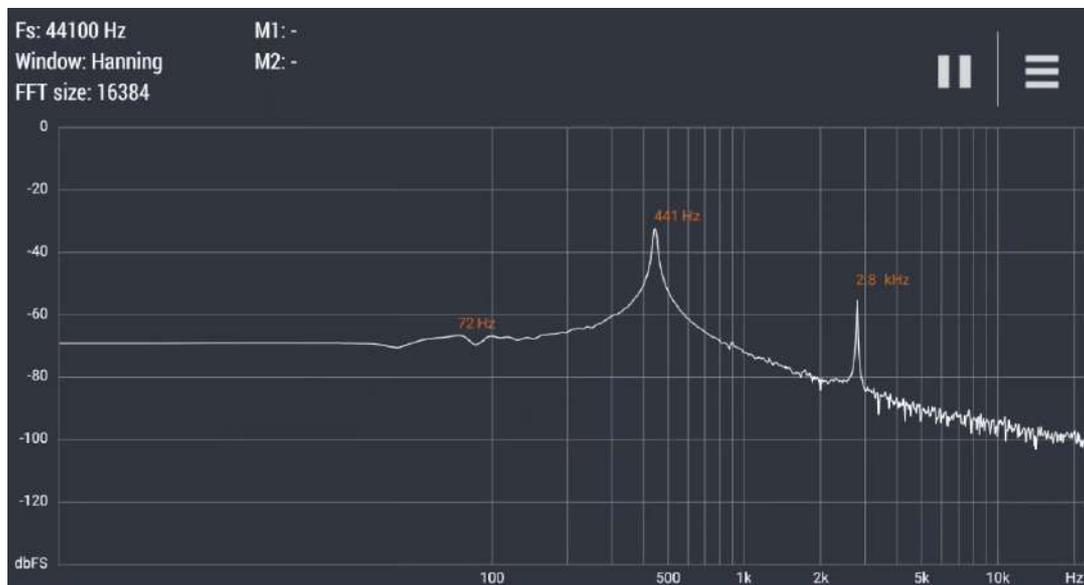


Figura 4.15. Plano armónico del sonido emitido por el diapasón en un tiempo posterior.

Esta composición es transitoria, es decir, de muy corta duración. Antes de los 2 segundos luego de la excitación, en la etapa de *decay*, los parciales superiores se amortiguan, se extinguen, sobreviviendo algún segundo más únicamente el de frecuencia del orden de 2.8 kHz, conocido como “tono de clang” (aproximadamente 6.27 veces el fundamental).

Para el ejemplo mostrado al cabo de 6 segundos medidos desde la percusión solo sobrevive el tono fundamental de 441 Hz en la etapa que se conoce como *sostén o sustain*.

Nota: Podemos adelantar a esta altura de la descripción que si se desea alcanzar rápidamente la etapa de *sustain*, minimizando (o evitando) los transitorios de *attack* y *decay*, pueden utilizarse mazas o baquetas con extremos cubiertos con goma o fieltro.

05 - Frecuencia del diapasón en función de la temperatura

¿Un diapasón de frecuencia nominal 440 Hz emite ese sonido a cualquier temperatura?

En esta oportunidad responderemos a esa pregunta a partir de cambiar la temperatura del objeto vibrante y registrar la frecuencia que emite al percudirlo.

Para modificar la temperatura de la horquilla metálica vamos a sumergirla en agua dentro de un vaso térmico en la cual colocaremos el sensor de un termómetro digital. Se muestran en la figura los componentes del equipo utilizado:



Figura 4.16. Diapasón, termómetro, vaso térmico y guantes de cuero.

El detalle fundamental del procedimiento es el siguiente: si bien nuestro objetivo es medir la temperatura del metal, la que mediremos es la del agua; ¿Bajo qué condiciones ambos valores coinciden? Definiremos que eso sucede, es decir que ambos cuerpos alcanzan el equilibrio térmico, luego de que ambos se ponen en contacto y el termómetro no registra variaciones, siempre y cuando el líquido se agite en forma permanente.

El rango de temperaturas máximo disponible será (0°C, 100 °C). Si se desea ampliar el mismo debería sustituirse el líquido por otro de menor punto de fusión y/o mayor punto de ebullición como aceite. Sin embargo, decidimos no hacerlo ya que las temperaturas máximas superiores son potencialmente más peligrosas por errores en las manipulaciones y

porque nos interesa la posible relación en el rango de las temperaturas ambientes, muy inferior a aquel.

Las frecuencias se midieron con *Tune!It* ejecutándose como aplicación para celulares. Las temperaturas se midieron con termómetro digital comercial el cual informa una apreciación de pantalla de 0,1 °C y una precisión de 1 °C. Se tomó la precaución de secar el diapasón rápidamente antes de percutirlo para que su masa no se viera modificada por las gotas de agua que pudiesen quedar adheridas. Se repitió la medida varias veces para una misma temperatura.

Los resultados de las medidas de frecuencia en función de la temperatura se sintetizan en la gráfica de la figura 4.17.

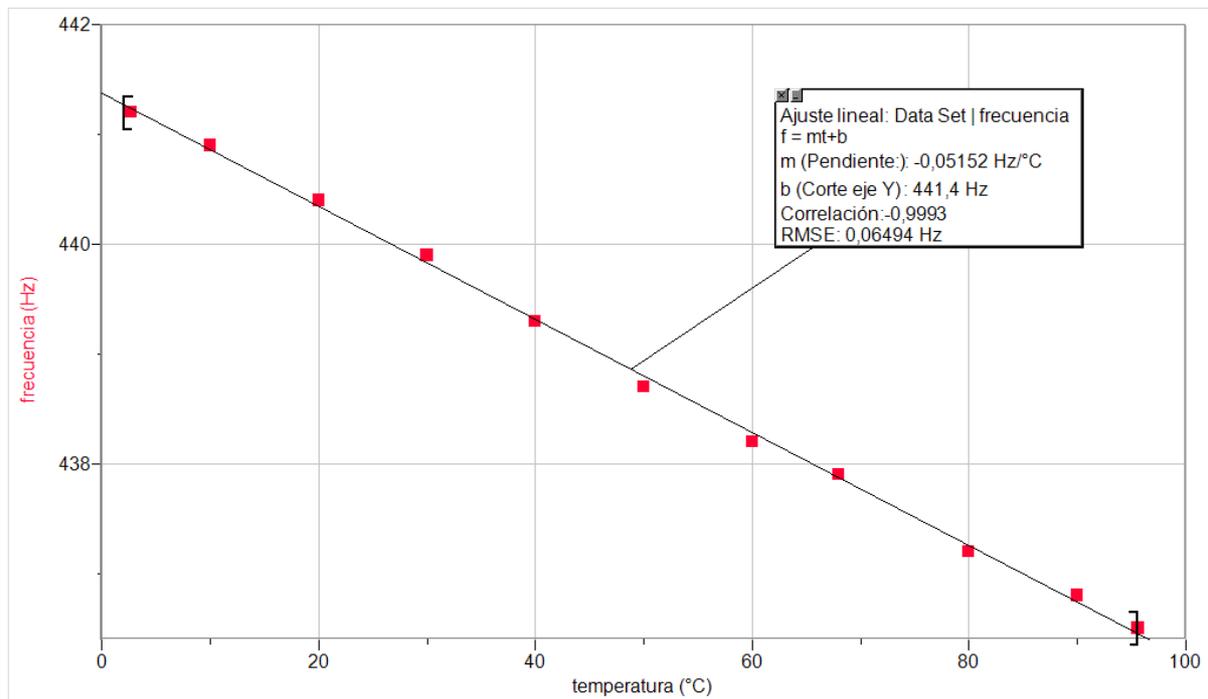


Figura 4.17. Gráfico frecuencia en función de la temperatura para un diapasón con un ajuste lineal superpuesto.

A partir de la misma podemos concluir que el diapasón emite frecuencias que dependen en forma lineal decreciente con la temperatura con un razonable ajuste lineal el cual se puede considerar satisfactorio en esta primera aproximación y para el rango estudiado. Para el diapasón medido se puede determinar por interpolación que el mismo emite la frecuencia nominal de 440 Hz a una temperatura de 27 °C.

Precaución: como trabajaremos con temperaturas del orden de los 100 °C recomendamos colocar una manga de goma en el vástago del diapasón para evitar quemaduras. De todos modos, se recomienda siempre el uso de guantes con aislación térmica.

06 - Decaimiento: nivel de sonido del conjunto *diapasón-caja* en función del tiempo. Cálculo de gamma y Q

¿Cómo decae el nivel de sonido de un diapasón montado sobre su caja de resonancia con el transcurso del tiempo?

¿Puede ajustarse dicha evolución mediante una función sencilla?

Para hacerlo decidimos medir el nivel de sonido con la aplicación celular *Physics Toolbox Suite/Acústica/Medidor de sonido/Lectura Digital*. Inicialmente elegimos un momento del día con bajo nivel de ruido y trabajamos por encima del mismo. Se hicieron varias series de medida de dicha magnitud en función del tiempo y, al evidenciarse un comportamiento sistemático, se obtuvo el resultado de *nivel de sonido en función del tiempo* como muestra la gráfica de la figura 4.18.

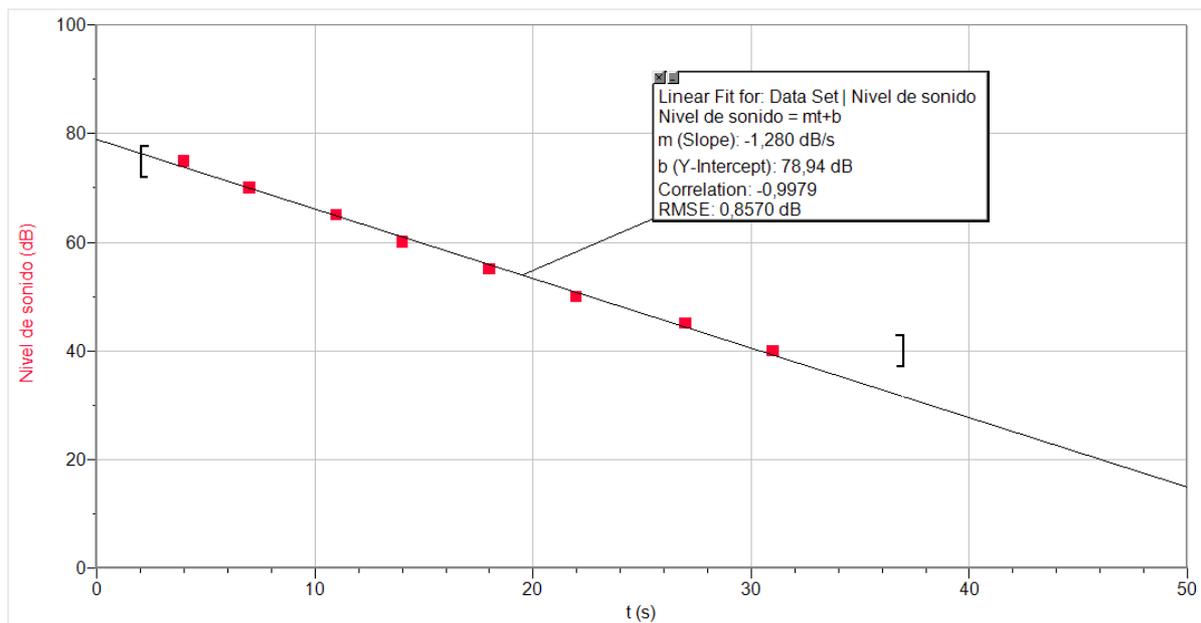


Figura 4.18. Nivel de sonido en función del tiempo para un diapasón montado en su caja.

Como las medidas del *nivel de intensidad de sonido* presentan una relación lineal con el *tiempo* de pendiente negativa, esto significa que la relación entre la *intensidad de sonido* y el *tiempo* es exponencial inversa.

Las medidas y el ajuste correspondiente permiten calcular⁸⁸ el *factor de calidad Q* del conjunto *diapasón-caja* que está en el orden de 10^3 (valor compatible con el esperado para diapasones comerciales).

⁸⁸ Agradecemos la deducción necesaria hecha por el profesor Francisco Echegorri incluida en Benítez et al. (2016).

07 - Microafinación: ajustando la frecuencia del diapasón con o'rings

¿Puede modificarse la frecuencia que emite un diapasón sin modificar su temperatura?

Podremos responder a esta pregunta recordando que la/s frecuencia/s que emite cualquier cuerpo extenso elástico depende/n (dadas las condiciones de borde) de su elasticidad (la cual se modifica al variar la temperatura) y su densidad de masa (la cual varía muy poco con la temperatura). En este caso vamos a modificar la masa de las ramas del diapasón para responder la pregunta. Esto lo haremos en forma reversible mediante la colocación de pequeños y ligeros aros de goma, conocidos como *o'rings*, en cada una de sus ramas los cuales iremos colocando a diferentes distancias de sus extremos. A cualquier pieza que aporte masa extra a las ramas de un diapasón usualmente se lo conoce bajo el nombre de *jinete*.

Adquirimos en plaza los *o'rings* de diámetro interno algo menor al de las ramas de nuestro diapasón y poca masa (del orden de los 0,07 gramos cada uno). Los fuimos colocando a diferentes distancias medidas desde el extremo de cada rama hasta el centro del espesor del *jinete* y se obtuvo la gráfica *frecuencia en función de la posición* que se ve en la figura 4.19.

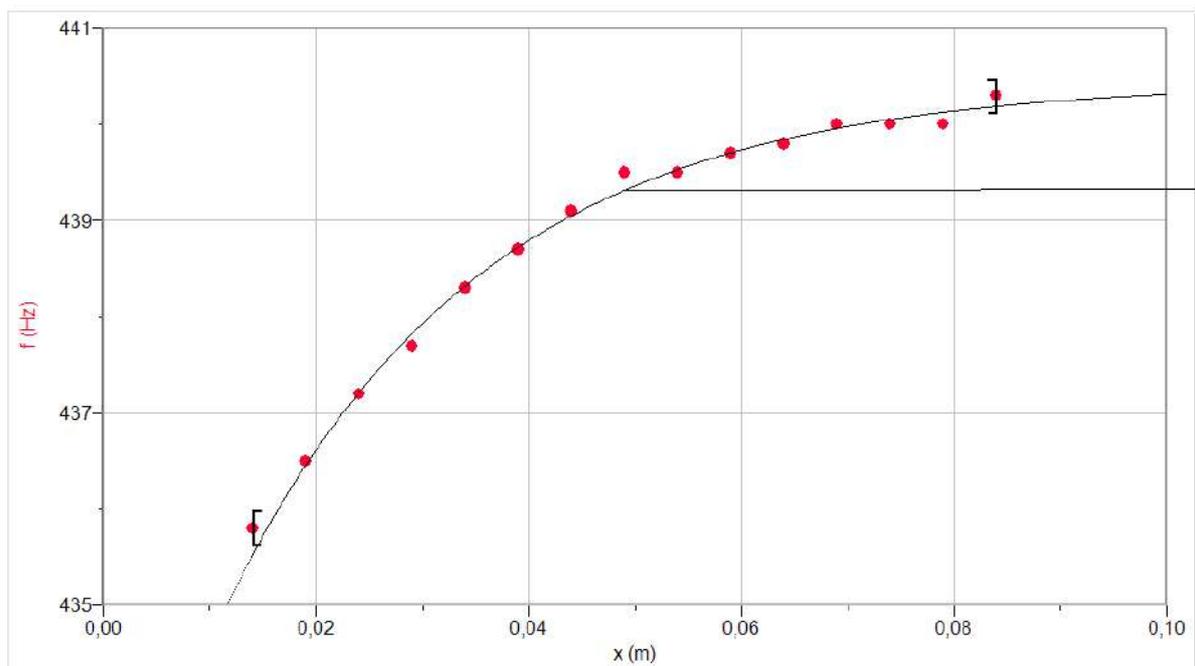


Figura 4.19. Frecuencia de un diapasón en función de la posición de los jinetes.

Podemos resumir los resultados afirmando que puede cambiarse la frecuencia nominal de un diapasón agregando masa a sus ramas. La frecuencia depende directamente y en forma no lineal (en la gráfica se usa una función de ajuste arbitraria a modo de ejemplo) con la distancia de los *jinetes* medidas con respecto al extremo de las ramas. Aumentando la masa agregada el efecto será más pronunciado.

Se nos ocurre que podríamos llamar a este procedimiento *microafinación* ya que podemos alterar ligeramente los valores de frecuencia del mismo modo que se logra en los

instrumentos de cuerda (como en los violines de calidad *estudio*) mediante las piezas conocidas como *microafinadores*; Estos elementos que se agregan al extremo de las cuerdas entre el puente y el cordal (ver figura 4.20, derecha) permiten (aunque a través de un mecanismo diferente en el cual se ajusta en forma fina la tensión de las cuerdas) un afinado preciso ya que las cuerdas se afinan modificando su tensión con clavijas de madera⁸⁹ (figura 4.20, izquierda).

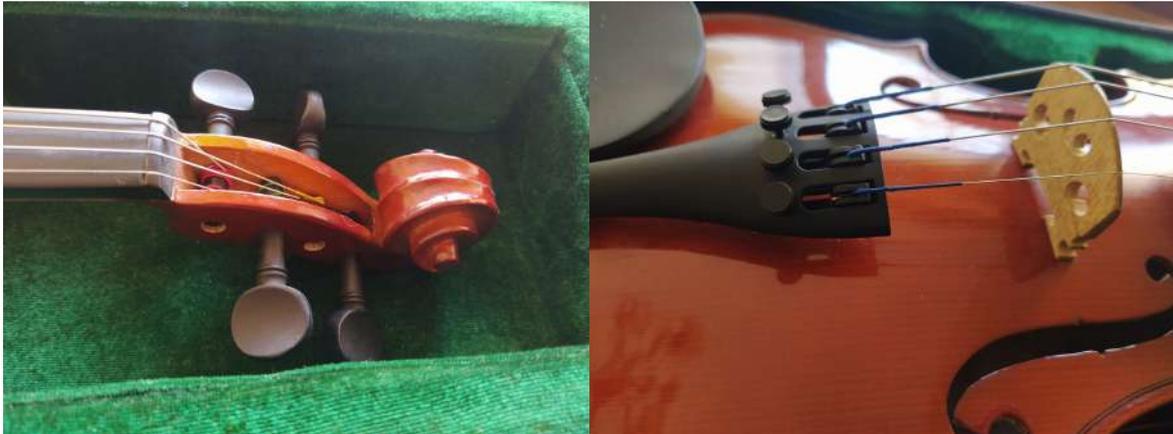


Figura 4.20. Afinación precisa de instrumentos musicales mediante agregados.

⁸⁹ Se usan clavijas de madera de ébano en violines finos y de plástico en los de calidad *estudio*.

08 - Percusión de una caja de resonancia de profundidad variable

¿Qué frecuencias se destacan al percutir la tapa de una caja de madera, sobre la que se puede fijar un diapasón?

Construimos una caja prismática de madera con un extremo abierto y otro cerrado mediante un pistón que encastra en la caja, de forma que la profundidad del volumen de aire puede ajustarse entre ciertos límites. Las dimensiones interiores de la caja son: 7,8 cm x 4,2 cm el orificio rectangular, y su largo total es 41,5 cm. El fondo y los laterales de la caja se construyeron de contrachapado de madera de 6 mm de espesor, y su tapa superior de contrachapado de madera de 3 mm de espesor. La figura 4.21 muestra una imagen de la caja, el pistón, y una maza de goma con la que percutimos la parte superior de la misma.



Figura 4.21. Caja de madera de volumen ajustable mediante un pistón y maza con la cual la percutimos.

En esta actividad se registra el sonido emitido por la caja luego de percutir sobre su tapa superior. La movilidad del pistón permite ajustar la profundidad de la caja a longitudes que pueden variar desde unos pocos centímetros hasta aproximadamente 40 cm. La figura 4.22 muestra el resultado del análisis para dos longitudes seleccionadas, mediante una Transformada Rápida de Fourier (FFT) calculada con el software Audacity, que se usó también para realizar el registro; el gráfico muestra los *espectros de frecuencias* obtenidos.

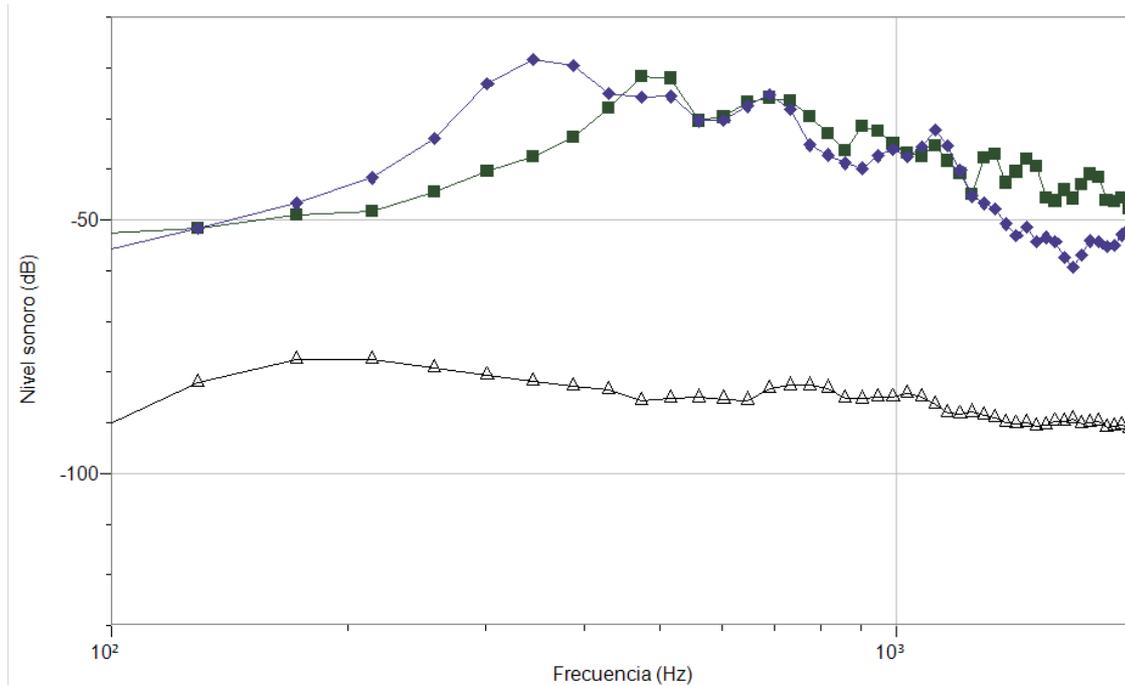


Figura 4.22. Espectros de frecuencia del sonido emitido por una caja percutida, para la longitud 0,200 m (rombos azules) y para la longitud 0,139 m (cuadrados verdes). El “silencio” del sistema de adquisición se muestra mediante triángulos huecos negros.

La representación del espectro se ha acotado a un rango relativamente pequeño de frecuencias con el objetivo de mejorar la visualización de la zona de interés. En esta zona se identifican varios picos en cada espectro, lo que sugiere una emisión de sonido complejo cuya composición podría analizarse. Si nos remitimos al pico asociado al mayor nivel sonoro de cada espectro, obtenemos los resultados que mostramos en el gráfico de la figura 4.23.

Una hipótesis⁹⁰ es que estas frecuencias mostradas corresponden al modo fundamental de vibración del aire en el interior de la caja, modelada con un extremo cerrado por el pistón y el otro extremo abierto al aire atmosférico. En esta configuración se verifica la existencia de un nodo de vibración del aire en el extremo tapado y un antinodo en las cercanías del extremo abierto. Es bien conocido el hecho de que debe considerarse una “corrección de extremo” para el extremo abierto, dado que el antinodo se produce fuera de la boca (en este análisis llamaremos A a la corrección de extremo).

⁹⁰ Quizás la más elemental, dado que puede pensarse también en la emisión de la tapa percutida, del resto de los componentes de la caja y/o sus acoplamientos.

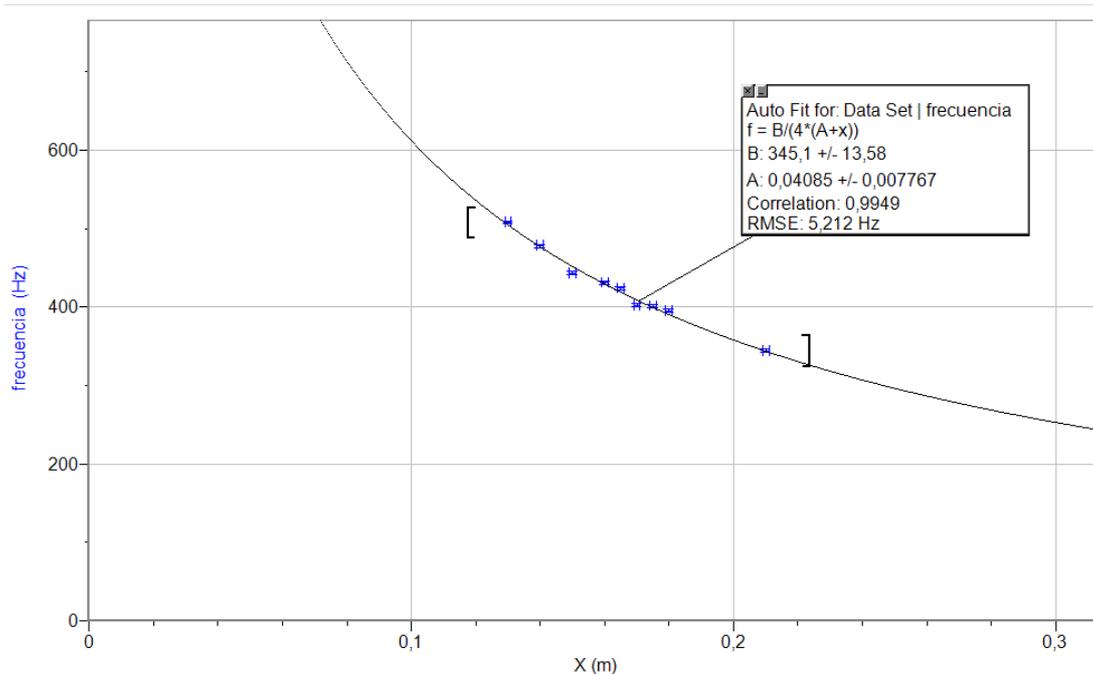


Figura 4.23. Gráfico de la frecuencia correspondiente al pico de mayor nivel sonoro en función de la profundidad (x) de la caja.

En el modelo propuesto, asumimos que el largo efectivo de la columna es $(A+x)$, siendo x el valor de la profundidad de la caja, y A un factor de corrección de extremo. El largo efectivo se debe corresponder con $\lambda/4$, siendo λ la longitud de onda asociada a la frecuencia f . Con esta aproximación, concretamos un ajuste al conjunto de valores mostrados de la forma:

$$f = \frac{B}{4(A+x)}$$

El ajuste devuelve los coeficientes A y B que, si la hipótesis es válida, corresponden con la corrección de extremo y la velocidad del sonido en el aire, respectivamente. Los resultados son los siguientes:

$$A = (4,1 \pm 0,7)10^{-2}m ; \quad B = (3,5 \pm 0,1)10^2m/s$$

con *correlación* = 0,9949 y *RMSE* = 5 Hz.

En síntesis, los resultados obtenidos para la rapidez del sonido en el aire y el valor de la corrección de extremo son consistentes con la hipótesis planteada al comienzo, al menos para la precisión en un contexto usual de enseñanza media. Complementariamente observamos para el caso de una frecuencia 440 Hz la profundidad de la caja se puede estimar en $x_{440} = (0,155 \pm 0,005)m$, lo que se ajusta a la longitud de las cajas de resonancia comerciales sobre las que se montan estos diapasones, de forma de acoplar la frecuencia del modo fundamental de la columna a la frecuencia del tono puro del diapason.

Información técnica. La grabación de estos sonidos se realizó mediante la tarjeta de sonido de una PC portátil doméstica y un micrófono externo NW 800 (condensador, omnidireccional, respuesta entre 20Hz y 6 kHz). Dicho sonido se registró con el software Audacity, mediante el cual se calculó una FFT (Hanning window, 1024) en cada caso. Los gráficos mostrados se construyeron en Logger Pro.

09 - Sonoridad de la frecuencia del tono puro de un diapasón

¿Pueden encontrarse diferencias en la sonoridad del tono puro de un diapasón montado sobre una caja cuyo largo se ajusta?

En esta sección mostramos resultados obtenidos al registrar el sonido que emite un conjunto “diapasón-caja”, para ciertas profundidades seleccionadas de la caja⁹¹. El montaje del diapasón sobre la caja se hizo mediante dos imanes. Uno de ellos (imán superior) tiene una parte cóncava que funciona como receptáculo de la esfera extremo del vástago del diapasón⁹². El otro imán se ubica en el interior de la caja debajo de la tapa (no visible en la imagen). La interacción magnética entre ellos permite fijar el diapasón a cualquier zona de la caja. Al diapasón se lo percute con una pequeña maza de goma que también aparece en la figura 4.24.

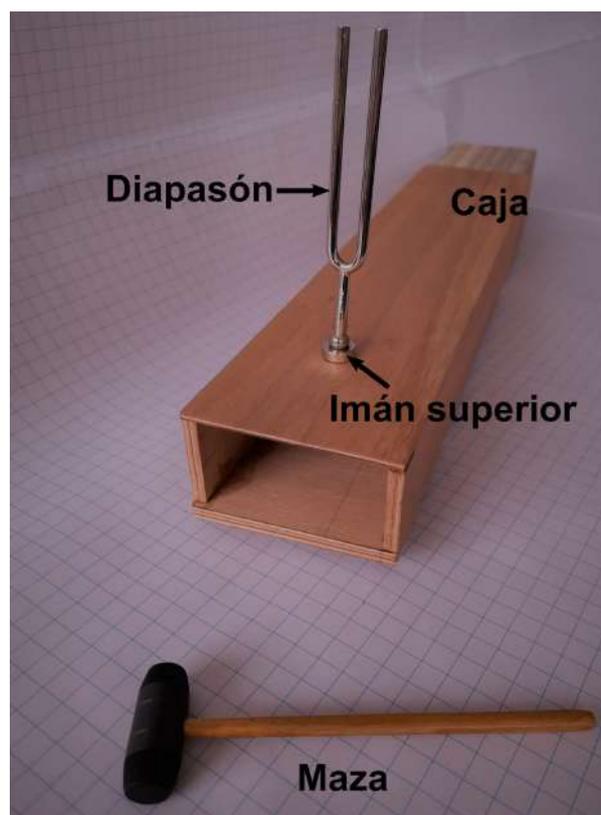


Figura 4.24. Diapasón montado mediante imanes sobre una caja de profundidad ajustable.

En este caso se procedió a grabar el sonido que emite el conjunto durante 0,10 s mediante micrófono e interfaz LabQuest mini (LQ-MINI), ambos de Vernier S & T, conectada a un equipo informático portátil luego de fijar la profundidad de la caja y de percudir el diapasón. Las medidas se repitieron para un conjunto discreto de profundidades cuyos valores se indican en la tabla 4.1. La figura 4.25 muestra la evolución en el tiempo de la presión sonora del sonido registrado y el resultado de una FFT aplicada al mismo, para una profundidad de la caja de 0,160 m. En el gráfico se registra un pico notorio que corresponde a una frecuencia acotada entre los valores 439,45 Hz y 444,34 Hz.

⁹¹ La caja se caracteriza en la sección *Percusión de una caja de resonancia de profundidad variable*.

⁹² En el Anexo se ve la parte superior del montaje.

N° de marca	L (m)
1	0,058
2	0,080
3	0,099
4	0,120
5	0,139
6	0,160
7	0,180
8	0,200
9	0,220
10	0,240
11	0,260
12	0,280

Tabla 4.1. Profundidades marcadas en la caja.

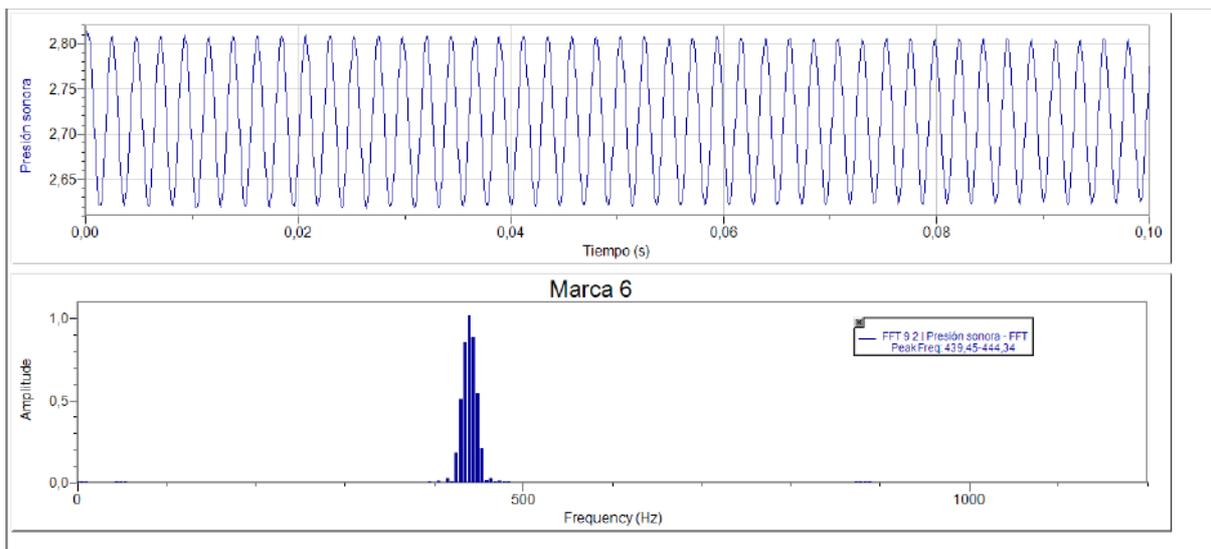


Figura 4.25. Presión sonora en función del tiempo (arriba) y su correspondiente transformada rápida de Fourier (abajo) para un rango de frecuencias de 0 a 1200 Hz, del sonido emitido por el conjunto “caja-diapasón” para una profundidad de la caja de 0.160 m.

Un segundo aspecto que proponemos analizar es la amplitud que presenta en cada FFT el pico de la frecuencia identificada en el párrafo anterior. Dado que el mecanismo de percusión no está normalizado, no podemos hacer afirmaciones concluyentes. A pesar de esto el gráfico de la figura 4.26 da una respuesta análoga a la esperada y que hemos encontrado en la actividad siguiente.

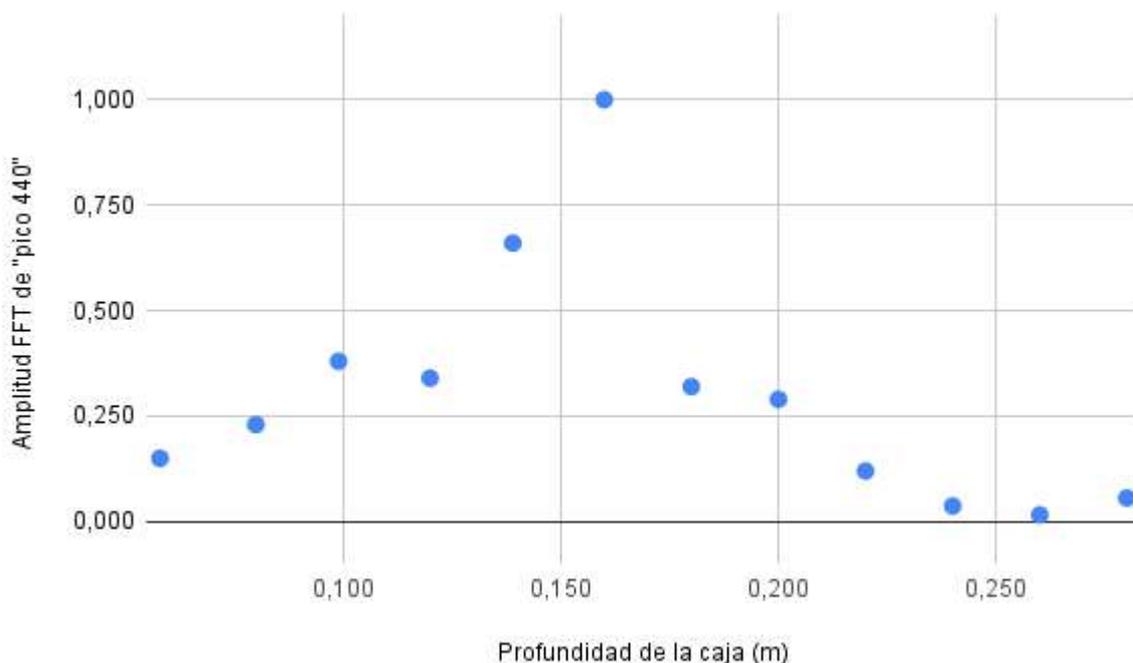


Figura 4.26. Amplitud del “pico 440” para diferentes profundidades de caja.

Una mirada que ponga el foco en los picos más relevantes encontrados en el rango de trabajo se muestra en la tabla 4.2. Allí se registran valores medios de las amplitudes de cada FFT correspondientes a frecuencias en las que se encuentra el pico más destacado. La tabla muestra, para las longitudes en que se realizaron medidas, que el pico de frecuencia (442 ± 3) Hz⁹³ prevalece en amplitud mientras la profundidad de la caja no supere 0,240 m. Para profundidades mayores, se registran picos de amplitud a una frecuencia cercana al doble de la anterior (882 Hz) para las tres longitudes mayores relevadas.

Marca	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Profundidad (m)	0,058	0,080	0,099	0,120	0,139	0,160	0,180	0,200	0,220	0,240	0,26	0,28
Frecuencia pico (Hz)	442	442	442	442	442	442	442	442	442	882	882	882
Amplitud del pico (UA)	0,22	0,14	0,35	0,32	0,62	0,95	0,30	0,27	0,11	0,06	0,20	0,06

Tabla 4.2. Frecuencia y amplitud del pico más destacada en espectros de sonidos emitidos por un diapason montado sobre una caja de profundidad variable.

La figura 4.27 muestra los espectros correspondientes a las dos situaciones más destacadas para las frecuencias encontradas. Para una profundidad de 0,16 m se observa el pico de mayor amplitud de todos los registros (cuyo comportamiento a lo largo de todas las longitudes registradas se muestra en la figura 4.26), lo que se representa en color azul (fig. 4.27(izq.)). El fenómeno que se destaca a la profundidad 0,26 m se caracteriza por una frecuencia de 882 Hz, como mencionamos (fig. 4.27(der.)).

⁹³ En la figura 4.26 lo llamamos “pico 440”.

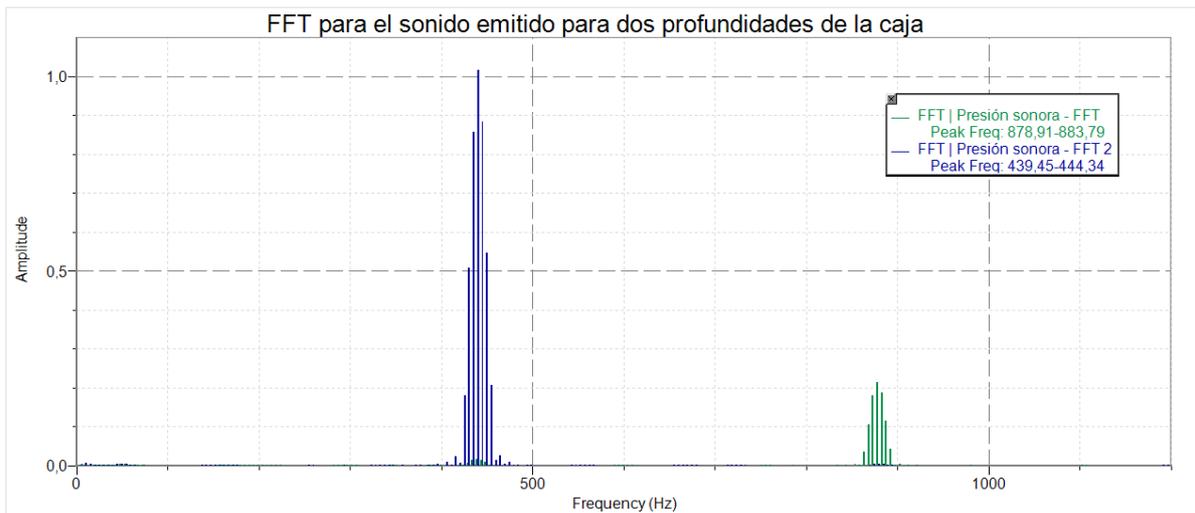


Figura 4.27. Espectro de frecuencia de los sonidos emitidos por el diapasón para dos profundidades de la caja: 0,16 m (izq., en azul) y 0,26 m (der., en verde).

Un aspecto que queda abierto en este trabajo es la identificación del origen de ese pico, que no puede soslayarse para profundidades “grandes” de la caja. En la búsqueda de respuestas sobre su origen pueden explorarse: las oscilaciones del aire en el interior de la caja, los modos de oscilación de la tapa, la frecuencia de alguno de los modos del propio diapasón, los acoplamientos entre lo anteriormente citado, etc.: la pregunta queda planteada para seguir pensando su respuesta.

Información técnica. La grabación de estos sonidos se realizó mediante un sistema de adquisición conformado por micrófono (MCA-BTA) e interfaz LabQuest mini (LQ-MINI) de Vernier S & T, conectada a un PC portátil doméstico. Se utilizó Logger Pro 3.16 para comandar la adquisición y obtener los valores y gráficos FFT (configuración por omisión). Los gráficos de las figuras se generaron en Logger Pro y mediante una Hoja de cálculo de Google. La imagen del Anexo incluye la interfaz gráfica de la aplicación *Tune! It*.

Anexo. Montaje del diapasón a la caja



Figura 4.28. Diapasón con su caja de profundidad variable.

La figura 4.28 muestra un diapasón, su caja y el mecanismo de sujeción. En la imagen de la izquierda se muestra el imán que se ubica sobre la tapa de la caja, que tiene una concavidad donde se asienta la esfera en el extremo del vástago; debajo se ubica otro imán de forma que ambos se atraigan presionando contra la tapa. En la imagen del centro se muestra el diapasón montado, con una pequeña arandela de goma (*o'ring*) que puede ajustarse a una de las ramas del diapasón para ajustar la frecuencia de tono puro hasta las décimas de Hertz, en este caso 440,0 Hz (como se mencionó en la Actividad 7). En la imagen de la derecha se muestra una captura de cuadro de [video \(accesible aquí\)](#), en la que se muestra a la app Tune! It midiendo la frecuencia con la precisión indicada.

10 - Resonancia: Nivel de sonido en función de la frecuencia de excitación en diapasón con caja

¿Cómo es la respuesta del nivel de sonido que emite un diapasón montado en su caja si se lo excita externamente con frecuencias por debajo, coincidentes y por encima de su valor nominal?

Esta actividad experimental cuantitativa consiste en excitar un diapasón (montado sobre su caja de resonancia) con valores tanto por debajo como por encima de su frecuencia natural de oscilación (440 Hz) para obtener la gráfica de *nivel de sonido en función de la frecuencia excitadora*.

Utilizaremos el diapasón comercial existente en la gran mayoría de los laboratorios de física de la DGES por su disponibilidad y porque, en caso de no contar con uno, puede adquirirse en plaza a bajo costo. La caja de resonancia puede construirse siguiendo las directivas de la actividad 8.

Podemos tener una idea del montaje y el procedimiento a seguir a partir del siguiente vídeo de muestra de un montaje equivalente: <https://youtu.be/D5HqdXdm8Ws>

En primer lugar, debemos medir la frecuencia nominal del diapasón. Para ello utilizaremos un micrófono RODE Lavalier GO conectado a un Smartphone XIAOMI A3 usando la aplicación Android *Physics Toolbox Suite* descargable desde <https://play.google.com/store/apps/details?id=net.vieyrasoftware.physicstoolboxsuitepro&hl=es&gl=US> en la opción *Analizador de Espectro*; Obtuvimos el valor 440,9 Hz.

Para excitar el objeto oscilante utilizamos la salida de audio de la netbook de Plan Ceibal *Wezen* (cuyas características de hardware y software pueden consultarse en <https://www.ceibal.edu.uy/es/articulo/wezen-2022>) ejecutando el oscilador online <https://www.gieson.com/Library/projects/utilities/tonegen/> el cual tiene una precisión de la centésima de Hz. En esta actividad necesitamos este detalle ya que la curva de resonancia de un diapasón es muy aguda, con un factor de calidad Q del orden de 10^3 (ver actividad 6).



Figura 4.29. Diapasón montado en su caja excitado por la bobina alimentada con la señal amplificada de un oscilador.

Para estar seguros que la salida de audio de la computadora emitirá únicamente un tono puro del valor fijado, ejecutamos el oscilador y monitoreamos el sonido producido por los parlantes incorporados con la aplicación de celular nombrada y definimos el volumen máximo mientras esta condición se cumple. Podemos ver que por encima de cierto valor aparecen parciales superiores.

La señal sintetizada debe amplificarse para lo cual utilizamos un dispositivo de buena calidad (*marantz sr4500 av surround receiver*). Conectamos a su salida (6-8 ohms de impedancia) un parlante y verificamos, como antes, la ausencia de frecuencias no deseadas. Construimos una bobina con núcleo de aire de alambre de cobre esmaltado de unos 0,6 mm de diámetro (como mínimo) y una impedancia que coincidiera con la citada. Enhebramos la misma en una de las ramas del diapasón y la sujetamos con un soporte. El volumen de salida del amplificador se elige (cumpliendo la condición inicial) y considerando la intensidad máxima que soporta el alambre utilizado. Como valor de referencia podemos decir que se pueden obtener resultados como los aquí presentados trabajando con una bobina que produzca en su centro, al volumen máximo definido anteriormente, un campo magnético máximo del orden de 1,0 mT.

A continuación, hicimos un “barrido” de frecuencias de excitación registrando para cada valor la frecuencia que emitía el diapasón y el nivel de sonido correspondiente. Debe aclararse que las frecuencias de excitación deben encontrarse en el rango de la mitad del entorno de 440 Hz. En nuestro caso trabajamos entre 215 a 224 Hz aproximadamente.

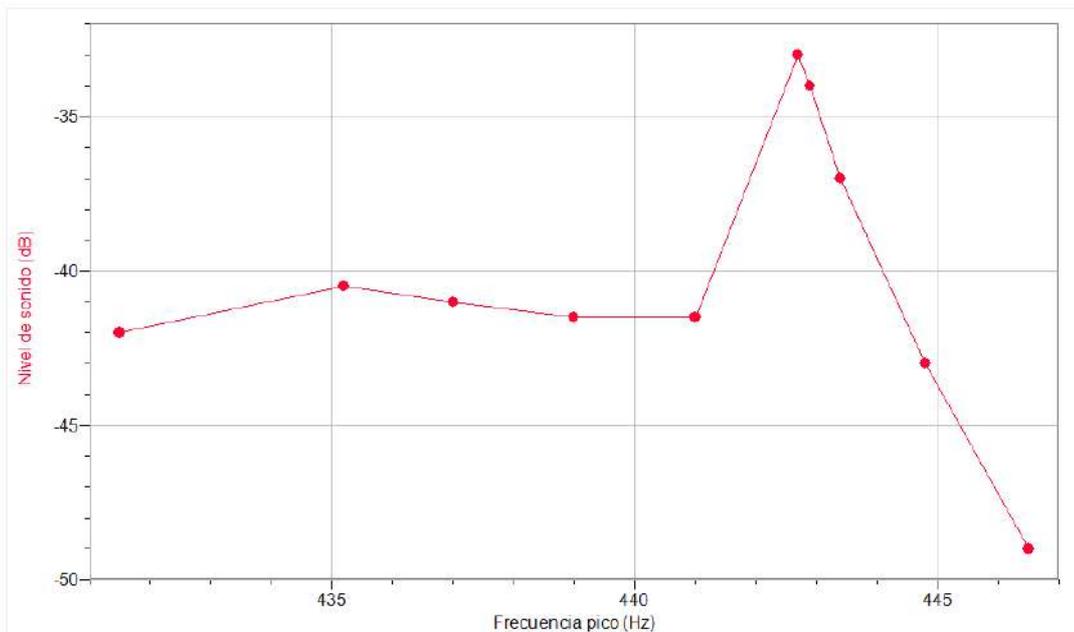


Figura 4.30. Diapasón: nivel de sonido en función de la frecuencia de la señal excitadora.

Del análisis de los datos y la gráfica de *nivel de sonido en función de la frecuencia excitadora*, puede observarse que el comportamiento es compatible con una respuesta resonante (con diferencias que pueden atribuirse a que la excitación no mantuvo sus características para toda frecuencia) con un máximo que se encontraría entre los 441,0 Hz y los 442,7 Hz. Si consideramos como razonablemente aceptable una incerteza en las medidas de frecuencia del orden de los 0,5 Hz podemos afirmar que el rango anterior comprende la frecuencia natural de oscilación del diapasón.

11 - Oscilaciones de columnas de aire en tubo cerrado-abierto: frecuencia en función del largo del tubo

¿Es posible hacer música con el aire?

Intentaremos acotar la pregunta a la columna de aire en tubos abiertos en un extremo y cerrados por el otro. Para que sea fácil de trabajar elegiremos como material el PVC, ya que se consiguen en plaza como componentes para instalaciones eléctricas o sanitarias. Ocho tubos se montaron en orificios de una placa de madera, como muestra la figura 4.31 (a).

Para excitar la columna de aire vamos a utilizar la salida de “sopladora” de una aspiradora doméstica (figura 4.31-b). Al colocar el extremo de la manguera junto al extremo del tubo se escucha una fuerte emisión de sonido complejo con una frecuencia fundamental medible, en el ejemplo mostrado, de 333 Hz (Figura 4.32).



Figura 4.31. Tubos montados sobre orificios de una placa de madera (a) y el extremo de una “sopladora” sobre la boca de uno de ellos (b).

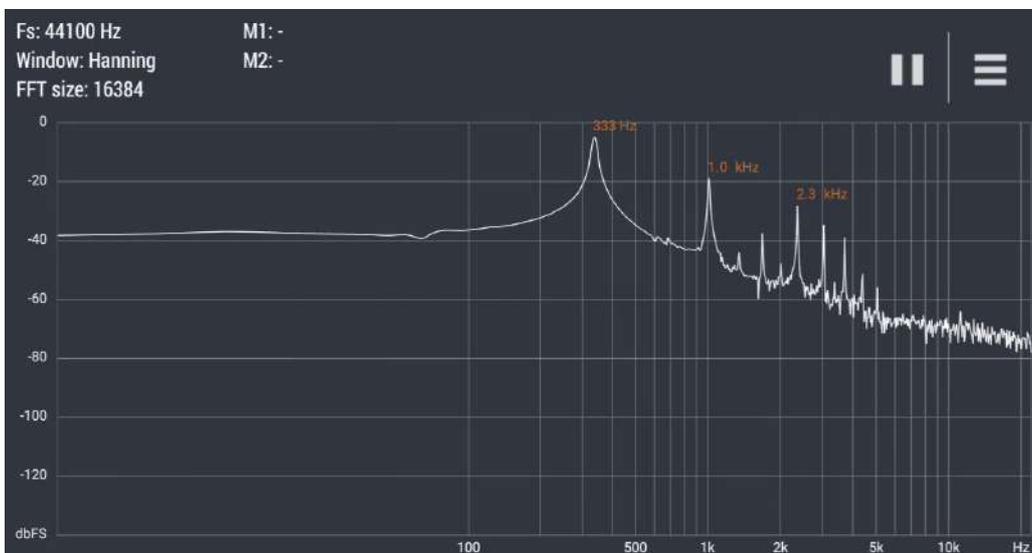


Figura 4.32. Espectro del sonido emitido por un tubo excitado mediante una “sopladora”.

Puede confirmarse con la gráfica anterior las previsiones teóricas sobre los parciales esperados para el tubo abierto-cerrado, los cuales son (prácticamente) múltiplos impares de la frecuencia fundamental.

Cortamos tubos de diverso largo, procedimos como se dijo y los resultados se resumen en la gráfica de *frecuencia en función de la longitud interna del tubo* adjunta (Figura 4.33)

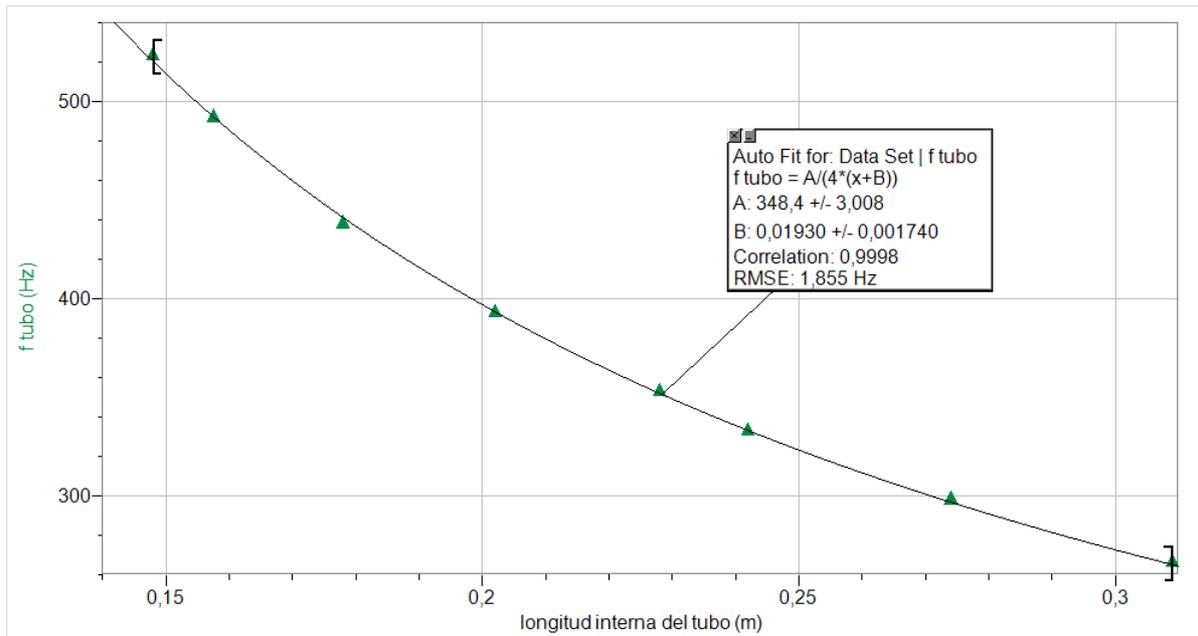


Figura 4.33. Frecuencia fundamental del sonido emitido por columnas de aire en tubos, variando su longitud.

El ajuste es el esperado ya que la dependencia es inversa y los coeficientes son compatibles con la velocidad de sonido en el aire (ecuación 17), la desviación de la frecuencia esperada por pérdidas en las paredes (Echegarri 2019) y la corrección de longitud por efecto de pestaña en el extremo abierto.

Con ayuda de esta información podríamos cortar un juego de tubos de longitudes adecuadas de tal forma que cada uno de ellos emita una de las notas de cierta escala musical.

Nota: Si se corta alguna pieza y emite una frecuencia menor a la esperada puede corregirse (afinarla) agregando dentro del tubo algún material granulado (como polvo o arena) de forma tal que acorte la longitud hasta lograr el objetivo.

También hay que tener en cuenta para el diseño que la frecuencia emitida depende de la velocidad del sonido en el aire la cual varía con la temperatura ambiente.

12 - “La reja que canta”. Metalofón⁹⁴: acoplando metales y columnas de aire

En actividades previas hemos contestado las preguntas: *¿Puede un trozo de planchuela de hierro (como el utilizado para hacer rejas) emitir un sonido musical?, y ¿Es posible hacer música con el aire?*

En esta actividad nos preguntamos:

¿Es posible “acoplar” pares “planchuela-tubo” para generar una “Reja que cante”?

Los Idiófonos “son materiales inherentemente sonoros, que no necesitan de una tensión adicional”, dice Aharonián en su *Síntesis de clasificación Hornbostel-Sachs de instrumentos musicales* (Aharonián, 2002, p. 156). En ella esta categoría ocupa el primer lugar: toda codificación que comience con el número “1” identifica a uno de ellos. A modo de ejemplo, las claves xilofónicas se encuentran entre los Idiófonos de entrechoque (1.1.1.1). Ejemplos de idiófonos de percusión (1.1.1.2) son el xilófono, la marimba mesoamericana, el litófono chino, entre otros. Un ejemplo de estos idiófonos en funcionamiento es este corto cinematográfico de la década de 1940, que muestra una “orquesta” de vibráfonos: [Soundie - Reg Kehoe and his Marimba Queens](#).

En esta sección nos concentramos en un metalofón, que consiste en un conjunto de barras metálicas apoyadas sobre una estructura firme, cada una de las cuales tiene ubicada debajo un tubo abierto-cerrado (con su extremo abierto más cercano a la barra), como muestra la figura 4.34 (a). Estos instrumentos, que podrían considerarse parte de la familia de los xilófonos, se ejecutan percutiendo las barras con baquetas cuyas cabezas pueden ser de diversos materiales dependiendo de las necesidades sonoras del contexto.



(a)



(b)

Figura 4.34 a) Metalofón. b) [Metalofón afinado sobre una escala diatónica de do mayor ejecutado por Juan.](#)

Nuestro instrumento está compuesto por un conjunto de ocho planchas metálicas de espesor incambiado⁹⁵. Estas se apoyan en dos lugares de su longitud sobre una estructura de madera; partiendo de un modelo de barra libre en ambos extremos, los apoyos se ubican

⁹⁴ Símil de vibráfono (con el motor que produce el *vibrato* apagado).

⁹⁵ En algunos instrumentos de esta familia se varía el espesor a lo largo de la plancha, con el objetivo de favorecer la emisión de un sonido con parciales superiores múltiplos enteros del fundamental (Massmann & Ferrer, 1993)

coincidiendo con los nodos del modo fundamental. Debajo de cada una de las planchas se coloca un tubo plástico *abierto-cerrado*. Las longitudes de las barras metálicas y las de los tubos correspondientes se definen, en primera aproximación, de forma tal que se acoplen adecuadamente sus respectivos modos fundamentales (ecuaciones 21 y 17, respectivamente). Cada uno de esos emisores compuestos (plancha y tubo) se encuentra “afinado” a una nota musical “no adjetivada” (Aharonián, 2002) de una escala diatónica de do mayor. La figura 4.34b muestra una forma de acceder a un video en el que Juan Trinidad Barnech ejecuta “a mano” el instrumento.

En las secciones siguientes mostramos algunos estudios que podrían desarrollarse a partir de la audición y/o grabación y posterior análisis del sonido emitido por el instrumento, cuando se percute una plancha en su centro.

Un panorama por los sonidos emitidos por el instrumento

El instrumento se ejecuta percutiendo las planchas metálicas en su zona central. Como se ve en la imagen de la figura 4.34a, existen ocho emisores cada uno de los cuales está afinado a una nota musical en la escala diatónica de do mayor.

En una primera aproximación auditiva pueden escucharse los sonidos emitidos cuando se golpea una plancha a la vez. En el [archivo de audio accesible aquí](#)⁹⁶ puede concretar esa escucha, y contestar preguntas como: ¿la secuencia de sonidos es desde los más graves a los más agudos disponibles?, ¿o es inversa a la anterior?, ¿a qué se deben las diferencias en niveles medios de los sonidos y en sus extinciones con tasas diferentes?, etc.

En la figura 4.35 se muestra el aspecto de una pista de audio en la que se representa la “forma de onda”⁹⁷ del audio enlazado (Audacity). Si descarga este archivo y lo abre en un software adecuado, puede seleccionar un intervalo de cada uno de los sonidos y verificar que se corresponden con alturas musicales de una escala de do mayor (do, re, mi, fa, sol, la) por ejemplo, mediante un espectro de frecuencias.

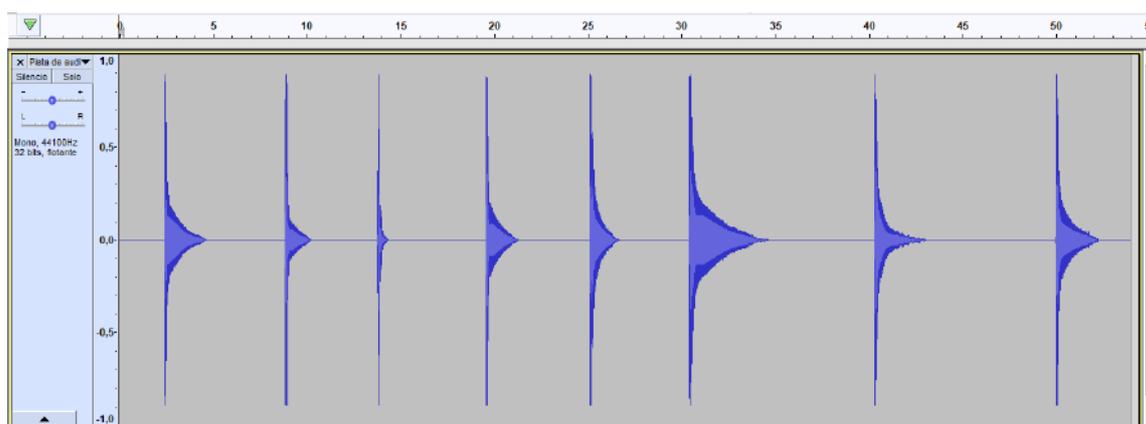


Figura 4.35. Pista de audio con la “forma de onda” (Audacity) de los sonidos emitidos por el vibráfono al percudir sus planchas.

En este tipo de instrumentos, las zonas en que se apoya cada plancha son cruciales para la eficiencia de la emisión. Como mencionamos en la actividad 2, la teoría que

⁹⁶ Es una grabación “en bruto” que se ha normalizado con Audacity.

⁹⁷ Ya se aclaró anteriormente que nos referimos con esta denominación imprecisa pero comúnmente utilizada al oscilograma *Intensidad/Presión de sonido (o su nivel) en función del tiempo*.

identifica modos de vibración de varillas libres en ambos extremos sostiene que, en el modo fundamental de una varilla de largo L , los nodos se ubican a una distancia de $0,224*L$ de cada uno de los extremos. De cumplirse esta condición se favorecerá la emisión a la frecuencia del modo fundamental y se desfavorece la emisión asociada a los modos de orden superior, en especial los que tengan antinodos en esas posiciones. De no hacerlo ocurrirá que el modo fundamental no tendrá la sonoridad que tendría en la situación anterior.

Considerando el párrafo anterior podemos indagar, mediante la escucha de la pista de audio si alguno de los sonidos se extingue rápidamente, o analizarla mediante un espectro de frecuencias, e intentar identificar la o las planchas están montadas de acuerdo al criterio ortodoxo.

Una frecuencia se destaca entre todas las posibles

Es sabido que mediante herramientas de captura, edición y análisis de audio disponibles, en especial las de acceso libre y gratuito para diversas plataformas⁹⁸ es posible obtener espectros de sonidos. Buena parte de los sonidos con los que nos encontramos son complejos, en el sentido de que al analizarlos (mediante Transformadas Rápidas de Fourier) identificamos más de una frecuencia presente. En algunos casos es de interés también conocer la evolución en el tiempo del nivel sonoro de cada uno de estos sonidos componentes. Algunas de las herramientas mencionadas proveen una forma de representar esa información en un *Espectrograma*.

La figura 4.36 muestra el espectrograma (Audacity) del sonido emitido por un par “plancha-tubo” de nuestro vibráfono al percutir la plancha con una maza de goma. Este corresponde al sonido que aparece en primer lugar en la representación de la figura 4.35.

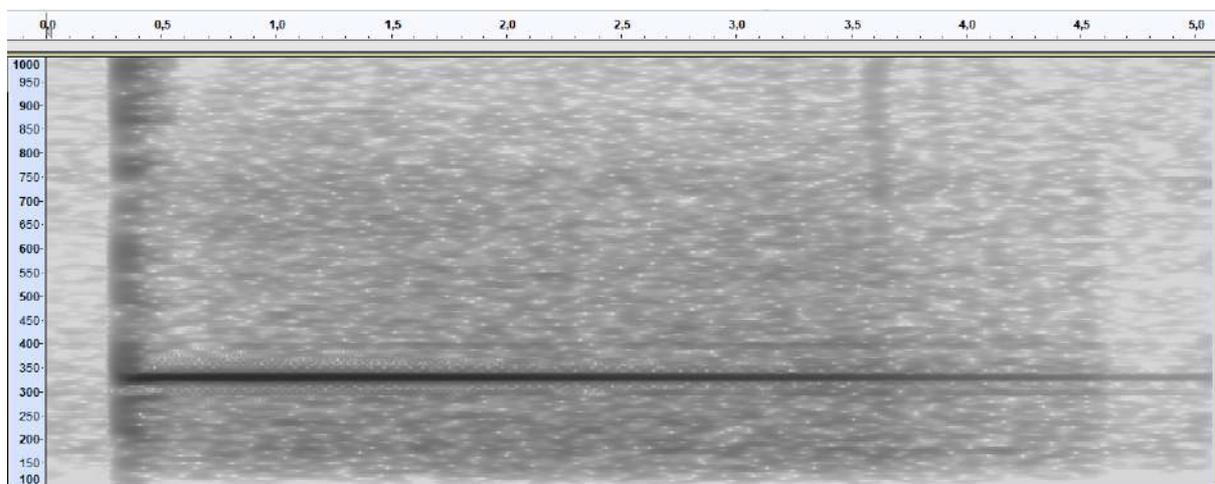


Figura 4.36. Espectrograma del sonido emitido por un par “plancha-tubo”, el rango de frecuencias va de 100 Hz a 1 kHz.

En relación al espectrograma de la figura 4.36, la representación en este software asocia “valores altos” de nivel sonoro a “valores bajos” de brillo⁹⁹, es decir que las zonas de menor brillo (más oscuras) corresponden a los sonidos de mayores niveles sonoros. Para tener una referencia asociada al brillo de las celdas, lo que se observa en la zona anterior al instante 0,25 s aproximadamente es el registro del silencio del sistema de adquisición. Para

⁹⁸ Como las mencionadas al comienzo de esta sección.

⁹⁹ En otros, como Phypbox, la codificación por omisión es inversa a la que mostramos aquí.

tiempos algo mayores a ese instante se observa una presencia de muchas frecuencias hasta el instante 0,5 s aproximadamente.

Lo más destacable de la representación corresponde a una frecuencia, que se ubica entre 300 Hz y 350 Hz, que persiste hasta que tenemos registro. Esta frecuencia caracteriza la emisión de la dupla “plancha-tubo”, y corresponde al acople de los modos fundamentales de la plancha modelada con extremos libres y la columna de aire cerrada en el extremo inferior del tubo y abierta en la cercanía de la plancha.

Variando el percutor

Más arriba afirmamos que al variar el material de la cabeza de la baqueta o maza con la que se percute una plancha permite producir sonidos con características diferentes. La prueba que exponemos aquí se obtiene al percutir de forma independiente una misma plancha del instrumento con una baqueta con cabeza de madera dura y otra con cabeza de goma.¹⁰⁰

Una primera aproximación perceptiva puede concretarse mediante la escucha de los sonidos emitidos luego de la percusión: [percusión con baqueta de madera](#), [percusión con maza de goma](#). Es notorio el “sonido metálico”¹⁰¹ que se escucha al comienzo de la pista correspondiente al golpe con baqueta de madera; que no aparece (o al menos no con la misma sonoridad) cuando se percute con maza de goma.

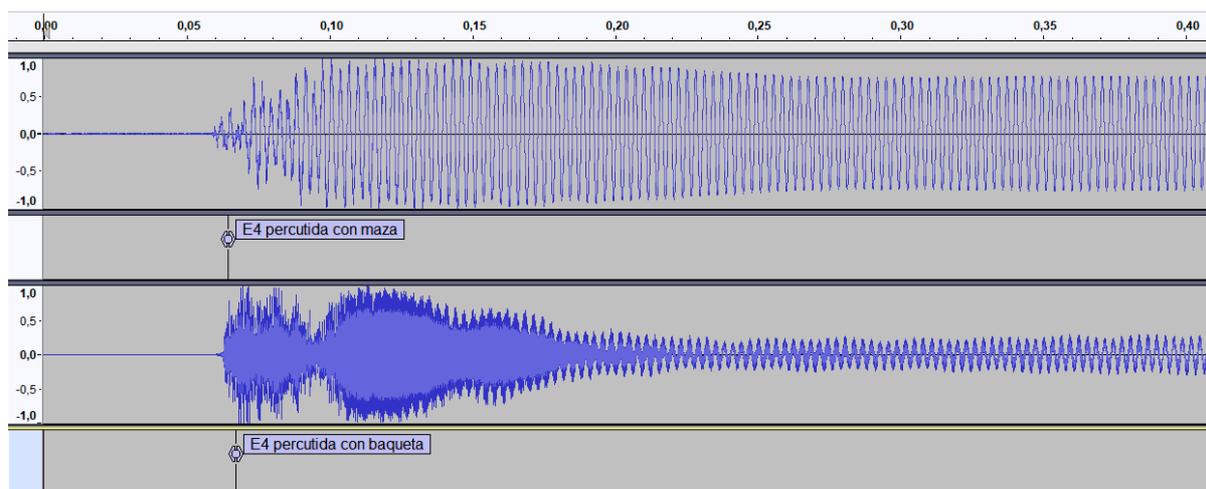


Figura 4.37. Pistas de audio del “primer segundo” del sonido emitido por un par “plancha-tubo” de nuestro “vibráfono”, percutido con maza de goma (arriba) y con baqueta (abajo).

La figura 4.37 muestra el aspecto de las “formas de onda” (Audacity), en función del tiempo (parte superior de la imagen) para el comienzo de la emisión. Una mirada cualitativa sobre la representación de la figura muestra una mayor “dificultad” en el gráfico producido con baqueta. Proponemos la siguiente hipótesis: la percusión con baqueta de madera produce una excitación en la que hay mayor presencia de parciales superiores -tanto en cantidad como en nivel sonoro- (asociado al “sonido metálico” inicial) de la barra, comparado con el golpe con maza de goma.

¹⁰⁰ Un aspecto, no probado en este trabajo, es generar la percusión con un cuerpo masivo que se deja caer desde una altura fija. De esta forma se podría controlar la cantidad de energía que ingresa al sistema “plancha-percutor-tubo”.

¹⁰¹ Los adjetivos como este tienen asociado cierto grado de subjetividad. Puede consultar una propuesta de sistematización en Massmann y Ferrer (60-61).

Una forma de contrastar la hipótesis planteada es visualizar los espectros de frecuencia (o plano armónico) de los sonidos referidos. Ellos se ven en la figura 4.38 y corresponden a un intervalo de tiempo de aproximadamente 120 ms contado desde el comienzo de la percusión, en un intervalo amplio de frecuencias (0 Hz a 10 kHz).

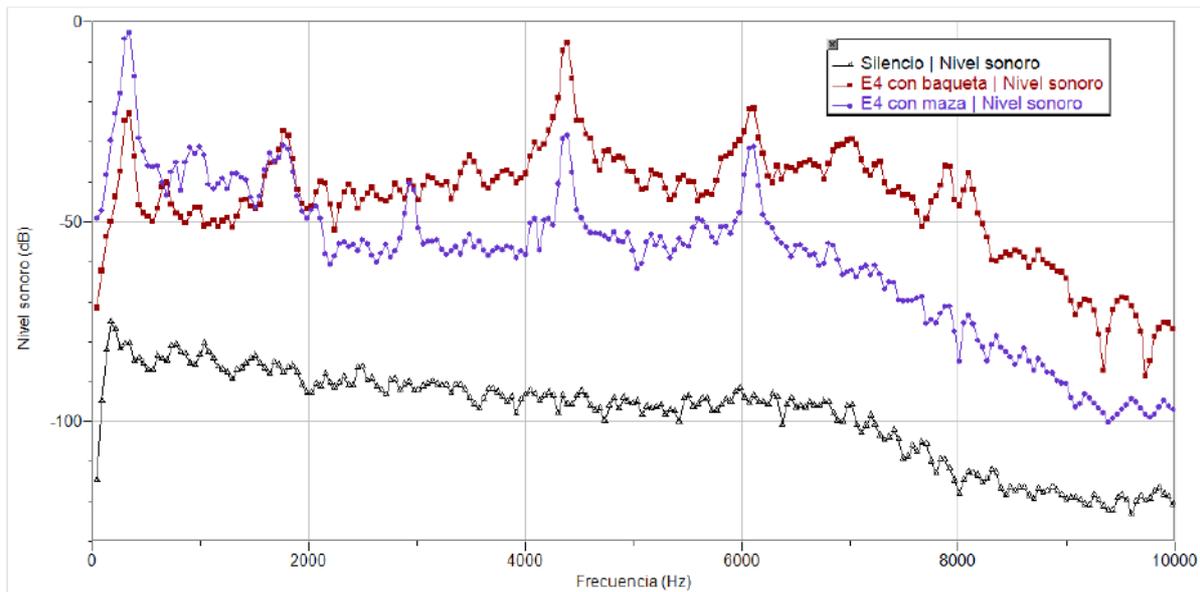


Figura 4.38. Espectros de frecuencia del sonido emitido por un par “plancha-tubo” al percutir con una baqueta de madera (sup., cuadrados morados), con maza de goma (medio, círculos azules) y silencio (inf., triángulos huecos negros).

La tabla 4.3 muestra una identificación de los picos observados en orden creciente de frecuencia (Picos), la frecuencia¹⁰² a la que se observa cada uno (f (Hz)), el cociente entre las frecuencias medidas y la frecuencia del primer pico (f/f_1), una identificación del modo normal de vibración de una varilla libre en sus dos extremos (Modo), factores variables identificados con cada modo -ecuación 21- en la teoría (Factores), cociente entre las frecuencias teóricas de cada modo y la frecuencia fundamental (Teo f/f_1), y la discrepancia entre los cocientes experimentales y los teóricos [$(f/f_1)-(Teo f/f_1)$].

Pico	1	2	3	4	5	6
f(Hz)	345	948	1766	2929	4393	6094
f/f1	1,00	2,75	5,13	8,50	12,75	17,69
Modo	1	2	3	4	5	6
Factores	9,7	25,0	49,0	81,0	121	169
Teo f/f1	1,00	2,58	5,06	8,36	12,49	17,45
(f/f1)-(Teo f/f1)	0,00	0,17	0,07	0,14	0,26	0,24

Tabla 4.3. Identificación de los primeros picos observados en el espectro de una dupla “plancha-tubo”,

Las discrepancias obtenidas no superan el 7% de su correspondiente valor teórico. Estas afirmaciones valen para ambas formas de percutir la plancha, dado que las frecuencias coinciden en las dos emisiones. Un aspecto no analizado aquí refiere a un

¹⁰² Obtenidas a partir de una FFT del sonido emitido, mediante Audacity.

estudio detallado del acoplamiento entre los dos osciladores. En rigor las frecuencias medidas corresponden al acoplamiento de los dos osciladores, fenómeno de importancia cuando se propone analizar instrumentos musicales con cierta complejidad estructural. Analizaremos algunos aspectos de este fenómeno al estudiar la emisión de sonido por una guitarra.

Un aspecto complementario se muestra en el gráfico de la figura 4.39. Allí se ve el peso relativo del nivel sonoro para cada parcial, en relación al pico más sonoro de cada serie¹⁰³. Para determinar la altura absoluta de cada pico se ha considerado el nivel de silencio que corresponde a esa frecuencia y luego se ha calculado el cociente en relación al pico de mayor valor (Nivel relativo).

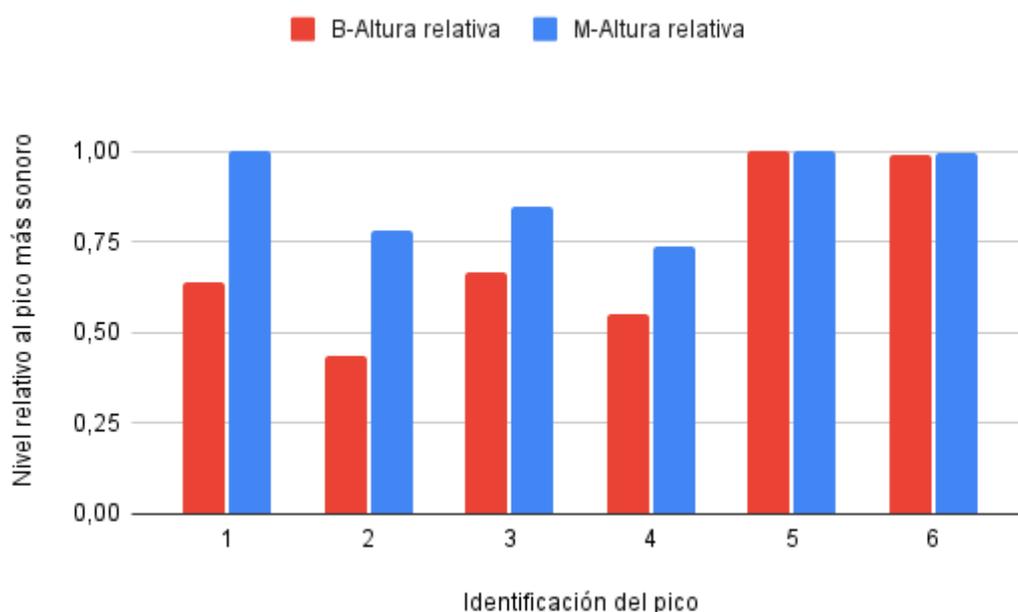


Figura 4.39. Nivel relativo al pico más sonoro de los primeros parciales, para la percusión con baqueta (izq. de cada par, barras rojas) y percusión con maza de goma (der. de cada par, barras azules).

Una mirada cualitativa al gráfico muestra una diferente composición en sonoridad para los parciales de ambos sonidos. En particular, en el sonido producido con maza (der. de cada par, barras azules) el modo fundamental es uno de los tres con mayor presencia sonora. En el sonido producido con el golpe de baqueta (izq. de cada par, barras rojas), el modo fundamental no posee la mayor presencia en términos de nivel sonoro, en particular los últimos dos parciales registrados tienen asociados niveles mayores. Esta característica del modo fundamental de la plancha (que es el que se encuentra acoplado en frecuencia con el modo fundamental de la columna de aire) puede correlacionarse con la evolución de la sonoridad de este sonido en contraste con su competidor. Lo último puede hacerse plausible al observar la evolución en el tiempo de los sonidos representados en las pistas de audio, en la figura 4.37.

¹⁰³ Dado que no hemos normalizado el golpe, no estamos habilitados a realizar comparaciones entre ambas series.

Información técnica. La grabación de estos sonidos se realizó mediante la tarjeta de sonido de una PC portátil doméstica y un micrófono externo NW 800 (condensador, omnidireccional, respuesta entre 20Hz y 6 kHz). La grabación de audio se hizo en el software Audacity, mediante el cual se calculó una FFT (Hanning window, 1024); el Espectrograma se configuró con un tamaño de archivo 4096, Hanning window, rango de frecuencias 100 Hz a 2 KHz, con representación lineal. Los gráficos mostrados se construyeron en Logger Pro y Libre Office Calc.

13 - Caracterización de propiedades físicas de las maderas y otros materiales

Para poder utilizarlos como madera sonora los “píceas abies” tienen que crecer muy rectos, por lo menos durante doscientos años y en ciertas altitudes donde reina una perfecta calma, lo que hace decir a los guardabosques de manera poética:

“la música nace del silencio”¹⁰⁴

Maderas utilizadas en tapa armónica y refuerzos.

Con el objetivo de tener una idea en primera aproximación de las características elásticas, inerciales, así como del nivel de amortiguación de diferentes muestras se seleccionaron tres cortes de diferentes maderas e iguales dimensiones. Se las montó como barra libre-libre apoyadas en las posiciones donde se ubican los nodos del modo fundamental y se las percutió en su punto medio. Se midió la frecuencia del sonido que emitieron (correspondiente al modo fundamental). A partir del registro del plano dinámico y el análisis del decaimiento se calculó el factor calidad Q. También se midieron sus masas para calcular sus densidades.

Estas medidas nos permiten hacer una primera comparación general entre las muestras particulares de las maderas analizadas. No son generalizables ya que cada pieza es única dependiendo sus características (entre otros factores) del tipo de corte (radial, cuartos, longitudinal) del cual se obtuvo, la temperatura, el nivel de humedad, el tiempo desde que fue aserrada, las condiciones de almacenamiento, e inclusive, su historia vibratoria. Este último aspecto es una conclusión de la experiencia de numerosos guitarristas y luthiers.

En la figura 4.40 se muestra el aspecto de las tres muestras de *Píceas sitchensis* ("Abeto Sitka"), *Thuja plicata* ("Cedro rojo", "Western Red Cedar"), y *Pseudotsuga menziesii* ("Abeto de Douglas", "Douglas fir"). La tabla 4.4 contiene información sobre las dimensiones de las muestras, y algunas cantidades que determinamos con el objetivo de una primera caracterización: masa, densidad, módulo de Young, velocidad de propagación, frecuencia fundamental y factor Q.

¹⁰⁴ Extraído de Orfeo magazine N° 13.



Figura 4.40. Tres muestras de madera que se han caracterizado.

muestra:	Dimensiones (cm)			Caracterización de cada muestra:					
	l	a	e	m (g)	ρ (kg/m ³)	Y (N/m ²) x10 ¹⁰	c(m/s) x10 ³	f ₁ (Hz)	Q x10 ²
<i>Picea</i>	50,98	5,1	1,9	208	421	1,36	5,68	428	1,7
<i>Thuja</i>	50,98	5,1	1,9	154	312	0,73	4,84	364	2,2
<i>Pseudotsuga</i>	50,6	5,1	1,9	260	530	1,15	4,66	350	1,7

Tabla 4.4. Dimensiones: largo (l), ancho (a), espesor (e), masa (m), densidad (ρ), módulo de Young (Y), velocidad de ondas longitudinales (c), frecuencia fundamental (f₁), y factor Q, para tres muestras de madera.

Maderas utilizadas en mástil, zoque, diapasón y refuerzos.

En la figura 4.41 mostramos imagen de *Cedrela odorata* (“Cedro rosa”) y *Astronium lecointei* (“Muiracatiara”, “Maracatiara”). La tabla 4.5 contiene algunas características físicas de las muestras.



(a)



(b)

Figura 4.41. Muestras de *Cedrela odorata* (a) y de *Astronium lecointei* (b).

muestra:	Dimensiones (cm)			Caracterización de cada muestra:		
	l	a	e	V (cm ³)	m (g)	ρ (kg/m ³)
<i>Cedrela odorata</i>	11,2	8,0	2,1	188	98	521
<i>Astronium lecointei</i>	8,1	4,3	0,52	18	15	833

Tabla 4.5. Dimensiones: largo (l), ancho (a), espesor (e), volumen (V), masa (m), densidad (ρ), para tres muestras.

Maderas en láminas o contrachapado y otros materiales utilizados en aros, fondo y adornos

En esta sección mostramos, en la figura 4.42, imágenes de muestras de tres materiales: *Entandrophragma cylindricum* (“Caoba Sapelli”, “Sapele”) en lámina de 0,5 mm de espesor; *Eucalyptus* (“Eucaliptus”) en contrachapado de 3 mm de espesor; y Cartón gris en plancha de 2 mm de espesor. Elegimos el tipo más común de cartón disponible en plaza: el “cartón gris”. Se trata de una plancha plana conformada por un aglomerado de fibras y terminado con hojas de papel gris adheridas a cada una de las caras de la muestra. La Tabla 4.6 presenta algunas características de estas muestras.

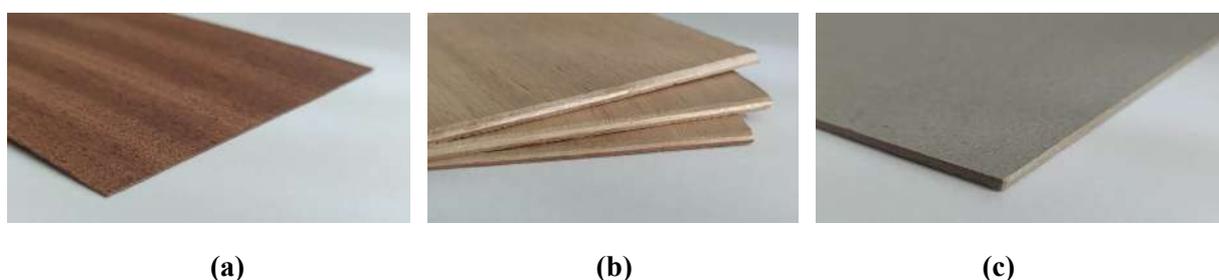


Figura 4.42. Muestras de *Entandrophragma cylindricum* (a), *Eucalyptus* (b), y Cartón gris ©.

muestra:	Dimensiones (cm)			Caracterización de cada muestra:		
	l	a	e	V (cm ³)	m (g)	ρ (kg/m ³)
<i>Entandrophragma cylindricum</i>	70,25	27,9	$\cong 0,05$	98	58	592
<i>Eucalyptus en contrachapado</i>	50,7	11,1	$\cong 0,3$	169	97	574
<i>Cartón gris en plancha</i>	20,4	17,3	$\cong 0,2$	70,6	38	538

Tabla 4.6. Dimensiones: largo (l), ancho (a), espesor (e), volumen (V), masa (m), densidad (ρ), para tres muestras.

14 - Un primer abordaje al estudio de la absorción de sonidos en láminas vibrantes

¿Más vale caja en mano que cartón vibrando?

Esta actividad se propone caracterizar la caja de resonancia de un diapasón (para dos situaciones) mediante la obtención de su curva de respuesta. Para ello construimos una caja de resonancia para un diapasón 440 Hz con láminas de 3 mm de espesor: la tapa en madera maciza de Douglas Fir y el resto de las caras en cartón gris, como se muestra en la figura 4.43.



Figura 4.43. Diapasón con una caja de resonancia construida con madera y cartón gris.

Estudiaremos dos casos: el sonido que se emite cuando el diapasón es percutido y fijado a la tapa y toda la caja vibra y luego repetiremos la excitación, pero con la caja apoyada de tal forma que se le impida oscilar al fondo.

En primer lugar, obtendremos la curva de respuesta para la caja con fondo fijo y fondo libre mediante la herramienta *Visual Analyser* (para SO Windows y de distribución libre). Este software permite extraer la gráfica de *Nivel de Sonido en función de la frecuencia* al percutir el objeto a estudiar (sin el diapasón colocado) con una baqueta de goma en diferentes puntos y reiteradas veces (se da una descripción más amplia de los detalles en actividades siguientes).

Se muestran tres curvas correspondientes al "fondo libre" (todas las caras oscilantes) y otras tres al "fondo fijo" (cara inferior apoyada en base rígida que le impide oscilar). Para el caso del fondo libre se observan tres resonancias (máximos del Nivel de Sonido) correspondientes a las frecuencias 260, 370 y 520 Hz que se convierten en dos, 350 y 440 Hz, para fondo fijo.

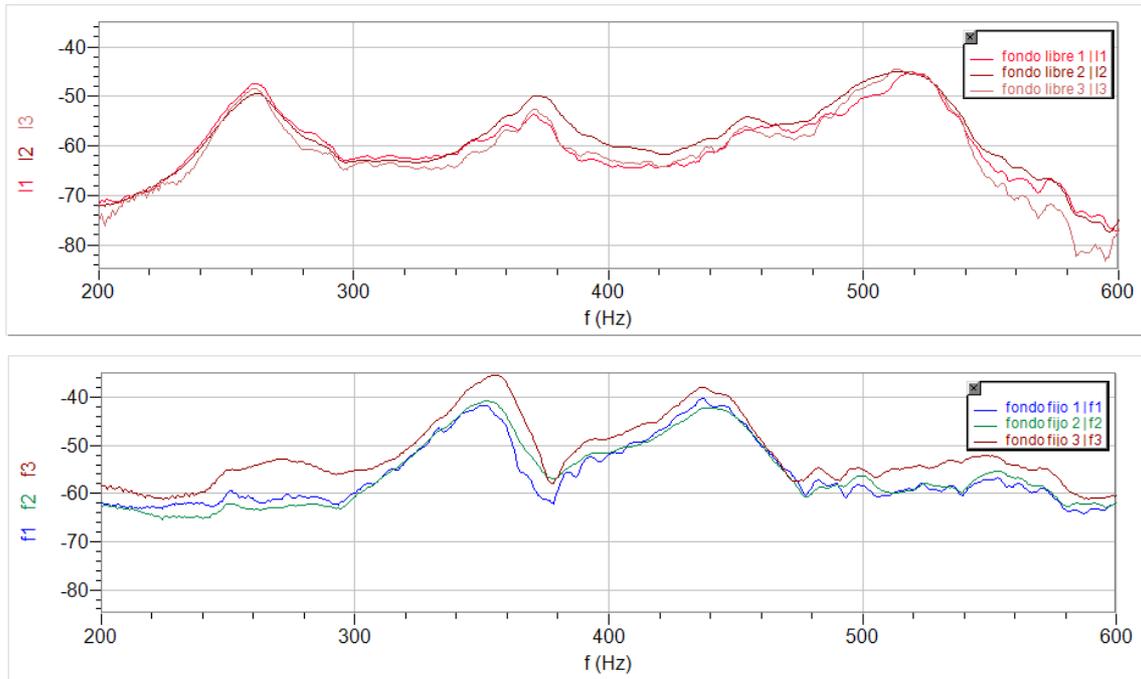


Figura 4.44. Curvas de respuesta para caja con fondo libre (superior) y fijo (inferior)

Si bien los golpes no están normalizados, se nota un nivel de sonido superior de los máximos correspondientes al fondo fijo con respecto al fondo libre.

Para confirmar esta observación cualitativa medimos el *Nivel de Sonido en función del tiempo* que emite el diapasón percutido y fijo a la tapa de la caja para ambos casos con la aplicación para Smartphones *phyphox/Amplitud de audio*. Los resultados son evidentes y se pueden apreciar en la figura 4.45.

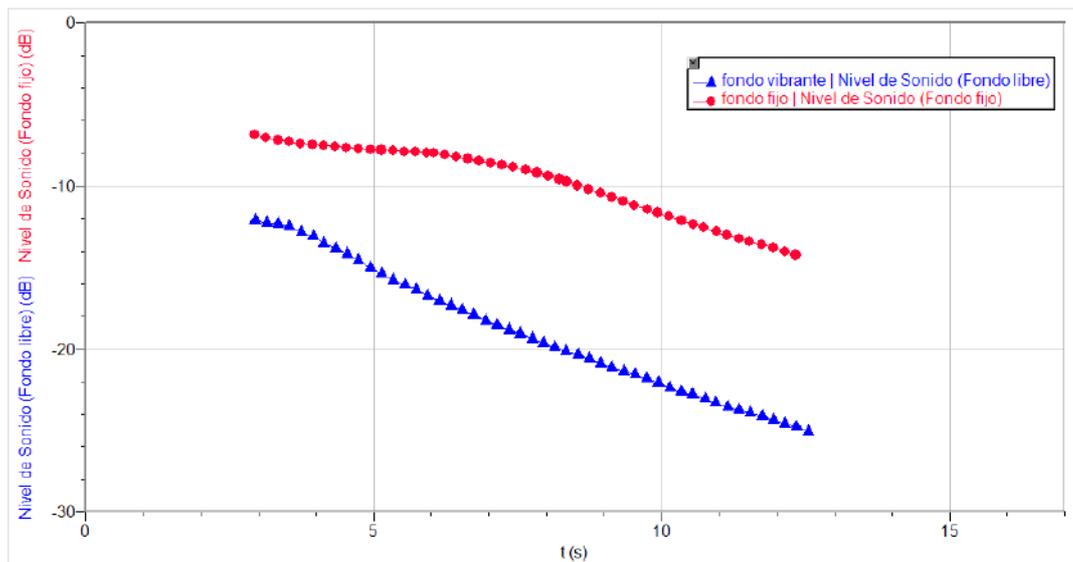


Figura 4.45. Nivel de Sonido en función del tiempo para fondo fijo (sup., círculos rojos) y libre (inf., triángulos azules).

Los resultados mostrados nos permiten concluir en primera aproximación lo que se puede percibir claramente al escuchar ambos comportamientos: la caja con fondo de cartón fijo funciona como resonador para el diapasón *la* 440 Hz mientras que con el fondo de cartón libre lo hace con una eficacia netamente inferior.

15 - Orejeando guitarras

*Me gusta lo desparejo*¹⁰⁵

Como hemos mencionado anteriormente, existen diversas técnicas que permiten registrar, modelar y analizar las características relevantes del sonido emitido por una guitarra. Una de ellas implica excitar de alguna forma al instrumento, y registrar el sonido radiado por él en algún punto cercano del espacio.

En esta actividad nos proponemos mostrar resultados del *Nivel sonoro en función de la frecuencia* del sonido radiado al percutir la tapa de una guitarra; lo que algunos autores llaman “curva de respuesta” del instrumento (Leipp, 1977). Este autor destaca enfáticamente que esta curva de respuesta es un elemento central a la hora de explicar el espectro del sonido del instrumento: el cuerpo del instrumento opera como un “filtro” sobre el espectro de frecuencia de la cuerda pulsada.

A partir de esta idea, mostramos la información obtenida, mediante el software *Visual Analyser*, al percutir la tapa de una guitarra (con sus cuerdas silenciadas) en diferentes puntos. La herramienta permite integrar la información del sonido producido por estos golpes, y puede generar un espectro de frecuencias, como los mostrados en las figuras siguientes. En este caso mostramos resultados para tres guitarras (A, B, C) en las que se ha procedido de forma análoga.

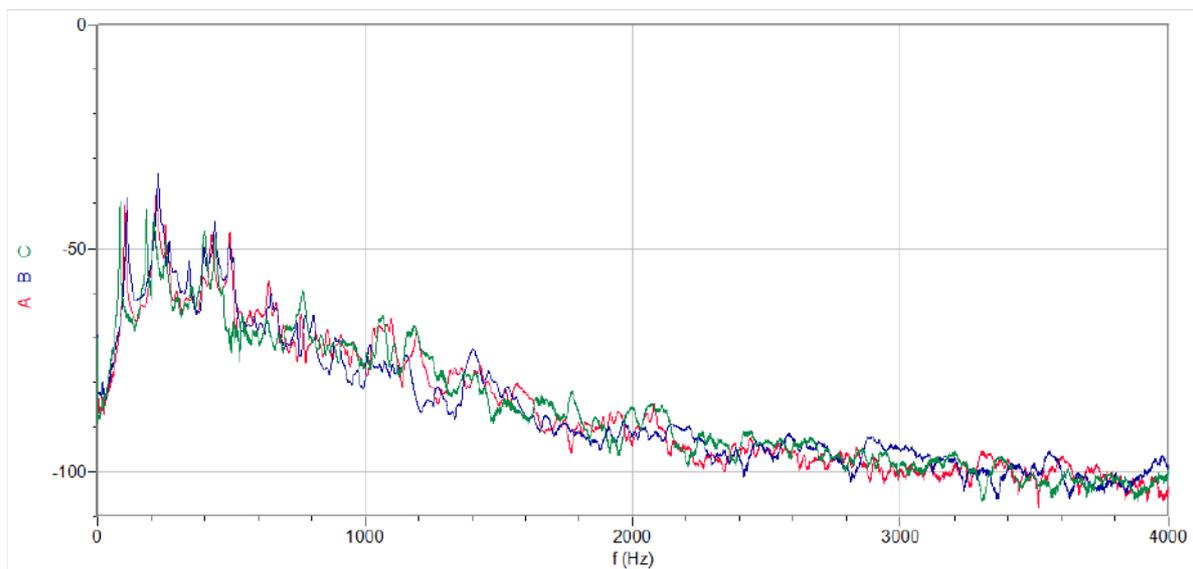


Figura 4.46. Nivel sonoro en función de la frecuencia (en un intervalo amplio) para el sonido radiado por tres guitarras, con las cuerdas silenciadas, al percutir sus tapas.

El gráfico de la figura 4.46 muestra el sonido radiado por tres guitarras en un intervalo amplio de frecuencias (0 Hz a 4 kHz). En este rango el nivel sonoro se extiende en un intervalo de 70 dB aproximadamente, en donde es notorio que las frecuencias más bajas tienen una mayor presencia en términos de intensidad. Un segundo aspecto a destacar es que ese comportamiento general es compartido por las tres curvas que corresponden a sendas guitarras.

¹⁰⁵ Esta cita introductoria es en homenaje a Fredy Pérez (ver fin de la sección 3 en esta obra).

Atendiendo exclusivamente¹⁰⁶ aspectos destacados en el párrafo anterior nos centramos a continuación en una zona de frecuencias bajas. En esa región serán más visibles las semejanzas y diferencias entre las curvas asociadas a las tres guitarras.

La figura 4.47 muestra los mismos resultados en un rango de frecuencias donde se deja ver solamente el primer pico, en cada una de las guitarras. Estos picos se ubican en las frecuencias: $f_A = 102$ Hz, $f_B = 110$ Hz, $f_C = 83$ Hz, para las guitarras A, B, y C, respectivamente.¹⁰⁷

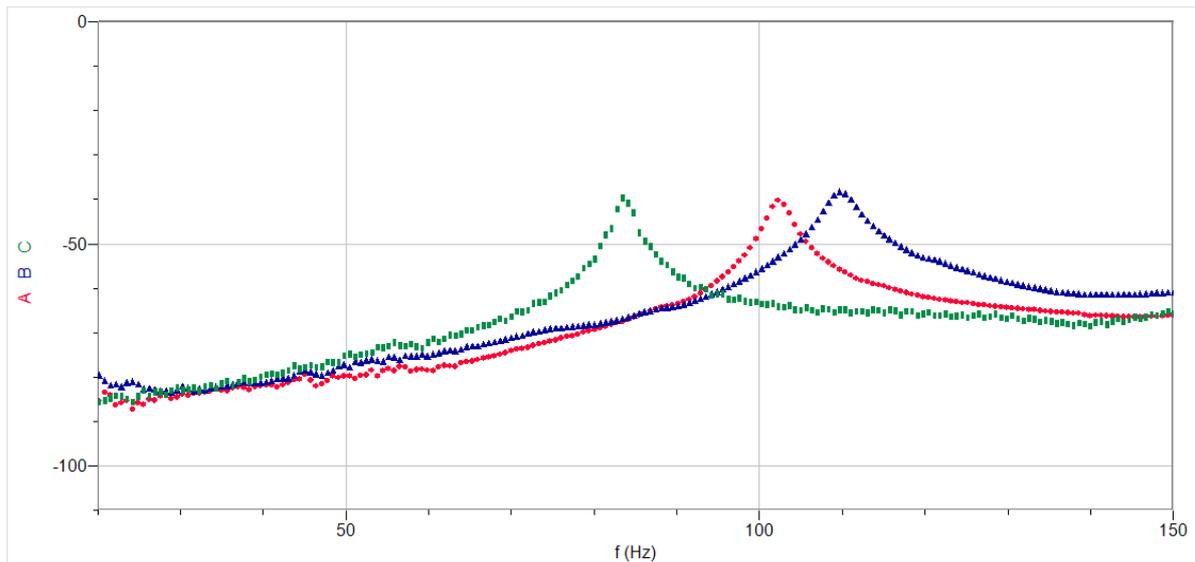


Figura 4.47. Primer pico en el Nivel sonoro en función de la frecuencia para tres guitarras, A (centro, círculos rojos), B (der., triángulos azules), C (izq., rectángulos verdes)

La ubicación en frecuencia de esos picos está asociada con algunas características de la estructura de la caja de la guitarra. En alguna de las actividades siguientes mostraremos modificaciones en el cuerpo de la guitarra que producen cambios en las coordenadas del primer pico, incluso su desaparición.

En la figura 4.48(a) se muestran los resultados anteriores en un rango de frecuencias (20 Hz a 330 Hz) que deja ver los primeros picos de orden superior. Centrándonos en ellos ahora, y desde una mirada cualitativa, los comportamientos de las guitarras A y B tienen puntos en común en relación a un segundo pico bien destacado, al punto que los valores de ordenadas son similares a sus respectivos primeros picos. La guitarra C muestra (en el entorno de la frecuencia 200 Hz) un comportamiento cualitativamente distinto a las anteriores; puede pensarse incluso (a modo de hipótesis) que el segundo pico se muestra desdoblado. En la figura 4.48(b) se muestra otra gráfica con las respuestas de los prototipos construidos para este trabajo: la SFE14 y la GSFE14. Dejamos en manos del lector interesado las conclusiones acerca de la información que aportan estas curvas a la luz de todo lo presentado en esta obra.

¹⁰⁶ No consideramos aquí, por ejemplo, que el oído humano medio tiene sensibilidades mayores a los sonidos con frecuencias definidas aproximadamente entre 1 kHz y 5 kHz.

¹⁰⁷ Observe que la frecuencia f_C es muy cercana a la frecuencia del modo fundamental de la cuerda sexta cuando suena "al aire", y algo similar ocurre con f_B en relación a la quinta cuerda "al aire".

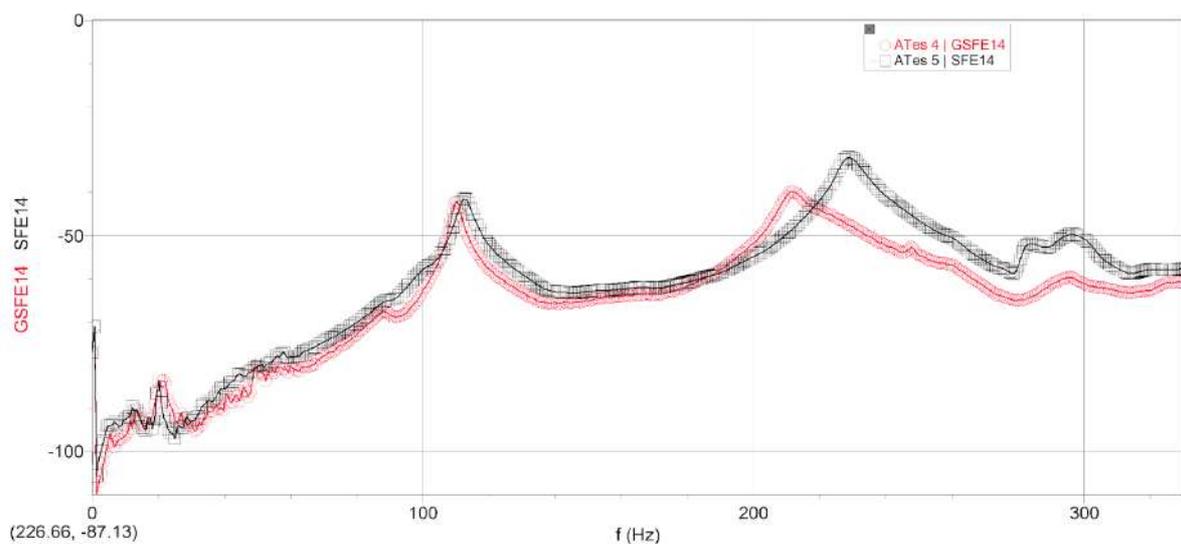
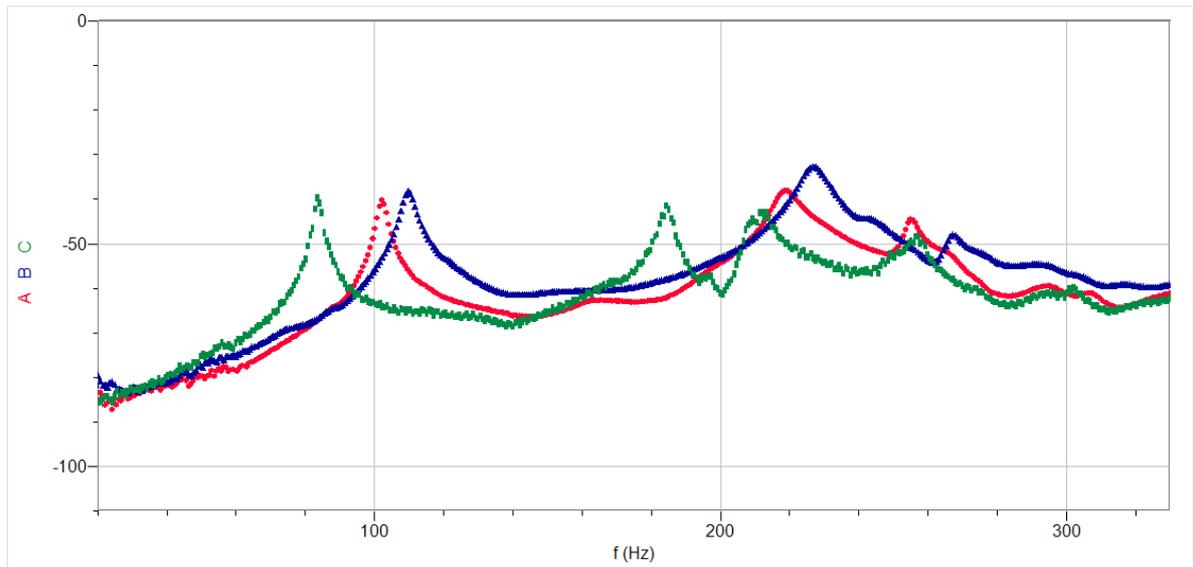


Figura 4.48 (a) Nivel sonoro en función de la frecuencia, para el sonido emitido independientemente por tres guitarras, en un rango que va hasta los 330 Hz (arriba). (b) Ídem para los prototipos SFE14 (cuadrados) y GSFE14 (círculos).

Mostramos en esta actividad una herramienta que nos permitirá analizar parcialmente el comportamiento a bajas frecuencias de una guitarra. Modelos básicos que aporta la literatura nos guiarán en el trabajo y permitirán identificar algunas correlaciones con aspectos estructurales del instrumento. Algunas de las actividades siguientes tratan estos tópicos.

16 - En boca cerrada ... ¿suenan guitarras?

¿Cómo afecta la emisión de sonido de una guitarra si se cierra o modifica el área de la boca?

Como hemos mencionado en una actividad anterior el sonido de un instrumento musical de cuerda (como la guitarra o el violín) puede modelarse para bajas frecuencias como un emisor primario (las cuerdas excitadas) más un “filtro” (la caja del instrumento y el aire en su interior), con ganancias tanto por debajo como por encima de la unidad, ya que hay frecuencias presentes en la excitación original de la cuerda cuyo nivel de sonido se refuerza al interactuar con el resonador. Por este motivo consideramos relevante caracterizar los aspectos que están a nuestro alcance del “filtro”, en un rango de baja frecuencia.

Caja de guitarra libre

Con este fin hemos registrado, mediante el software *Visual Analyser*, el sonido emitido por la caja de una guitarra libre¹⁰⁸, al ser percutida en varios lugares de su tapa armónica. La figura 4.49 muestra el resultado del nivel sonoro (en dB) en función de la frecuencia (en Hz) para un rango de frecuencia acotado entre 50 Hz y 600 Hz, en dos situaciones: cuando la boca de la guitarra se encuentra abierta (en rojo), cuando la boca se ha tapado mediante una placa circular liviana (en violeta).

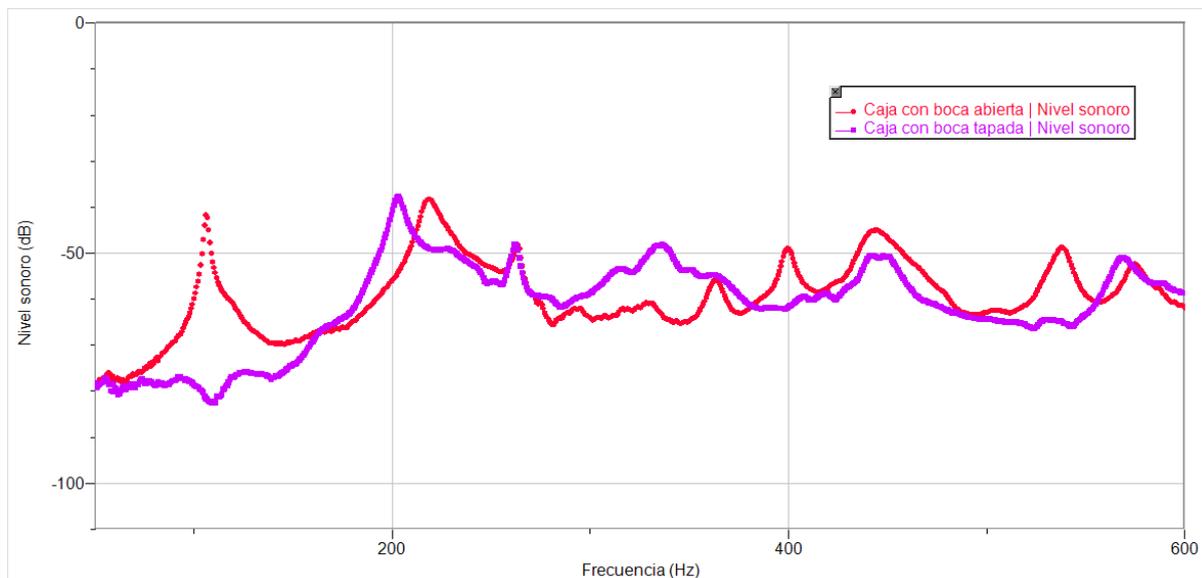


Figura 4.49. Sonido emitido por una caja de una guitarra libre con su boca abierta (círculos rojos) y con su boca cerrada (cuadrados violetas).

Una primera exploración de resultados muestra algunos aspectos que destacamos a continuación. Para el caso de la boca abierta, se identifican dos picos en los niveles sonoros, ubicados en las frecuencias $f_1 = 106$ Hz, y $f_2 = 209$ Hz. El resto de los picos se encuentran unos 10 dB por debajo de los anteriores, salvo uno ubicado en la frecuencia 445 Hz que le sigue en orden de intensidad a los dos primeros.

¹⁰⁸ Se encuentran libres de moverse todas sus partes; además de no tener su encordado.

Consideremos ahora la representación del nivel sonoro registrado en el caso de la boca tapada. Si miramos los resultados en el sentido de las frecuencias crecientes, el primer resultado notorio es que en el entorno del valor f del gráfico anterior no se encuentra un pico, sino más bien una breve depresión en el nivel sonoro. En segundo lugar, se puede interpretar que hay un corrimiento hacia las frecuencias más bajas del segundo pico (ubicado ahora en la coordenada 203 Hz).

En tercer lugar, destaca una superposición en las coordenadas del “tercer pico” (263 Hz, -48 dB). En cuarto término, se observan situaciones similares a las del primer pico a frecuencias mayores, donde “hubo un pico” cuando la boca estaba abierta no se registra aquí (400 Hz y 538 Hz).

Aros y fondo inmovilizados

Un experimento citado por Fletcher y Rossing (2010) propone colocar a la guitarra en una cuba con arena de forma de inmovilizar el fondo y los aros de la misma. La figura 4.50 muestra la imagen de la misma caja de guitarra que utilizamos en la descripción anterior asentada en un recipiente que contiene arena. En una sección introductoria comentamos que esta disposición experimental permite modelar al sistema físico con una aproximación que en la literatura se llama “de dos masas”, o “de dos osciladores”.

Un aspecto que se ha cuidado en este desarrollo experimental es mantener incambiada la masa de la tapa armónica (y la distribución) al tapar la boca.¹⁰⁹ Esto se logra adhiriendo al interior de tapa armónica y a ambos lados de la boca mitades idénticas al disco que cumple la función de *tapa de la boca* cuando no funciona como tal.



Figura 4.50. Caja de guitarra con su boca tapada inmersa en una caja con arena.

En la figura 4.51 se muestra el nivel sonoro del sonido emitido por la caja en función de la frecuencia, para un rango acotado de bajas frecuencias, al ser percutida de forma similar a como se describió antes. La representación en rojo muestra el caso en que la boca está abierta, y la representación en violeta es con la boca de la guitarra cerrada.

¹⁰⁹ En otras actividades de esta sección se muestran cambios originados en la adición de masa a la tapa.

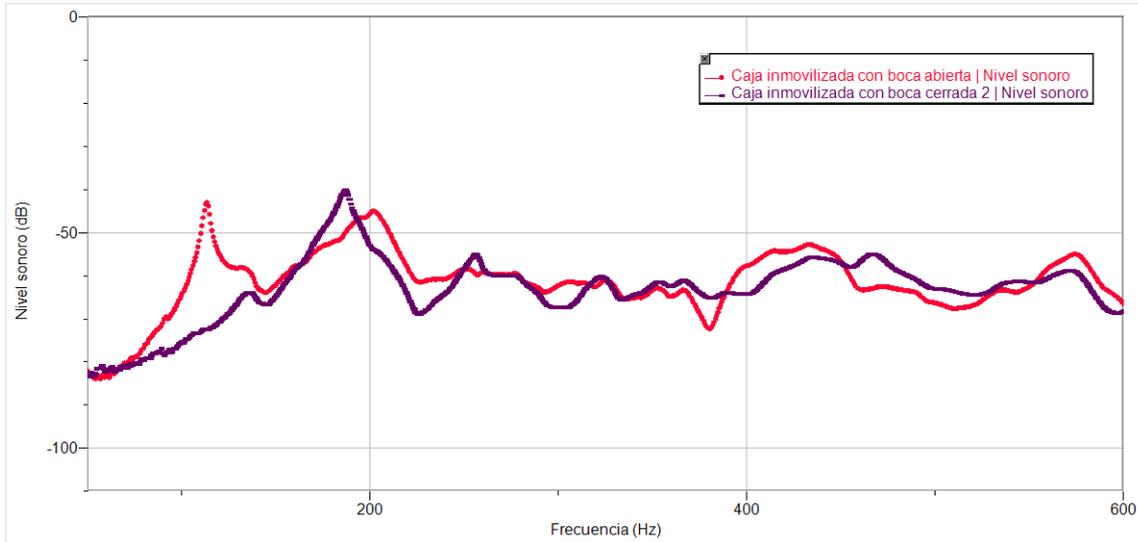


Figura 4.51. Guitarra inmobilizada en una caja con arena. Con boca abierta (círculos rojos) y con boca cerrada (rectángulos violetas).

En relación a las frecuencias más bajas dentro del rango que se muestra en el gráfico observamos los picos en las frecuencias que se indican en la tabla 4.7.

Situación	Frecuencia pico 1 (Hz)	Frecuencia pico 2 (Hz)
Boca abierta (caja inmobilizada)	113	203
Boca tapada (caja inmobilizada)	no presente	186
Boca abierta	106	209
Boca tapada	no presente	203

Tabla 4.7. Frecuencias asociadas a los dos primeros picos del sonido emitido por una caja de guitarra.

En las últimas dos filas de la tabla se registran las ubicaciones en frecuencias de los dos primeros picos para el caso en que el fondo y los aros no se inmobilizaron. Se observan corrimientos en las frecuencias, algunos de los cuales se pueden entender al aproximar la caja mediante modelos de osciladores acoplados.

Helmholtz escondido tras el escenario

Consideremos los resultados de la tabla 4.7 para el caso de aros y fondo inmobilizados), e incorporamos la perspectiva del *modelo de dos osciladores acoplados* en donde mostramos un resultado sencillo que vincula las frecuencias observables (f y f_+) con las frecuencias del modelo: la del oscilador que modela la tapa armónica (f_p) y la que corresponde a Helmholtz (f_h). En el caso en que el orificio está tapado, se tiene una situación cercana a la oscilación exclusiva de la tapa, por lo que podría utilizarse el vínculo mencionado para estimar la frecuencia de Helmholtz.

Tomamos de la tabla los siguientes datos: $f_- = 113$ Hz, $f_+ = 203$ Hz (boca abierta); asumimos que la frecuencia $f_+ = 186$ Hz (boca tapada) es una buena estimación de la frecuencia del oscilador que modela a la tapa armónica ($f_+ \approx f_p$) acoplada al aire encerrado. Sustituyendo en la ecuación 23, se obtiene el resultado $f_h \approx 139$ Hz. Este resultado es acorde con una estimación realizada a partir de la geometría de la caja¹¹⁰, y además es consistente con la afirmación de que f_h está más cerca de f_- que de f_+ (Meyer, 1974, citado por Fletcher y Rossing, 2010).

Una boca de tamaño variable

Un aspecto que puede resultar confuso al observar la comparación de las dos gráficas de la figura 4.51 es: ¿qué fundamenta la afirmación de que el segundo pico deriva hacia las bajas frecuencias cuando se tapa la boca?, ¿podría tratarse de un corrimiento del primer pico? Una indagación sobre ese aspecto particular nos llevó a diseñar una forma de distinguir estos aspectos que consiste en tapar la boca con discos que tuvieran orificios de radios diversos.

La figura 4.52 muestra la imagen de la caja inmobilizada en arena con el disco en el que se han marcado y perforado orificios circulares de radio distinto (se muestran el más pequeño (a) y el más grande (b) de los realizados). Aquí también se ha tenido el cuidado de mantener incambiada la masa de la tapa armónica (y su distribución), adhiriendo al interior de la misma (a ambos lados de la boca) las mitades de los trozos del disco que fueron quitados en cada paso que implicaba agrandar el orificio.

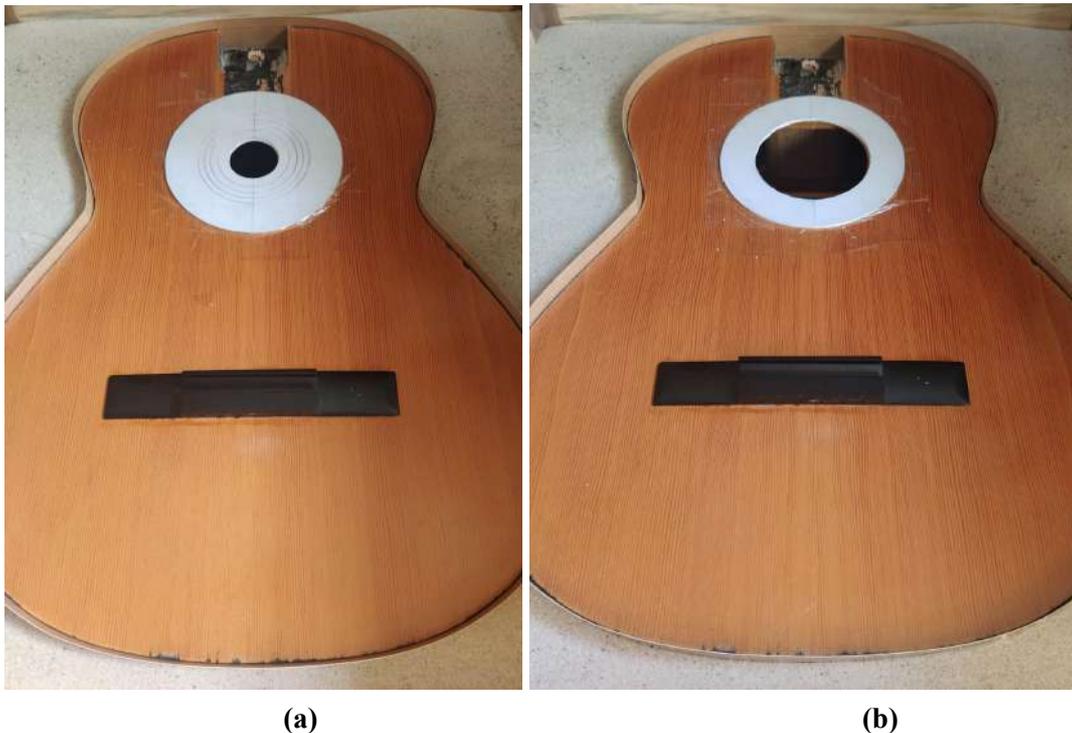


Figura 4.52. Discos con orificios circulares de radios variables como bocas de una caja de guitarra empotrada mediante un baño de arena.

¹¹⁰ En su artículo de 1980 Christensen aclara que para cavidades como la caja de una guitarra el cálculo estándar para la frecuencia de Helmholtz arroja un resultado mayor al medido ya que el valor de f_h depende de la ubicación de la boca y del alto de los aros.

Los resultados obtenidos para los diferentes orificios practicados en el disco que oficia de tapa de la boca se muestran en la figura 4.53.

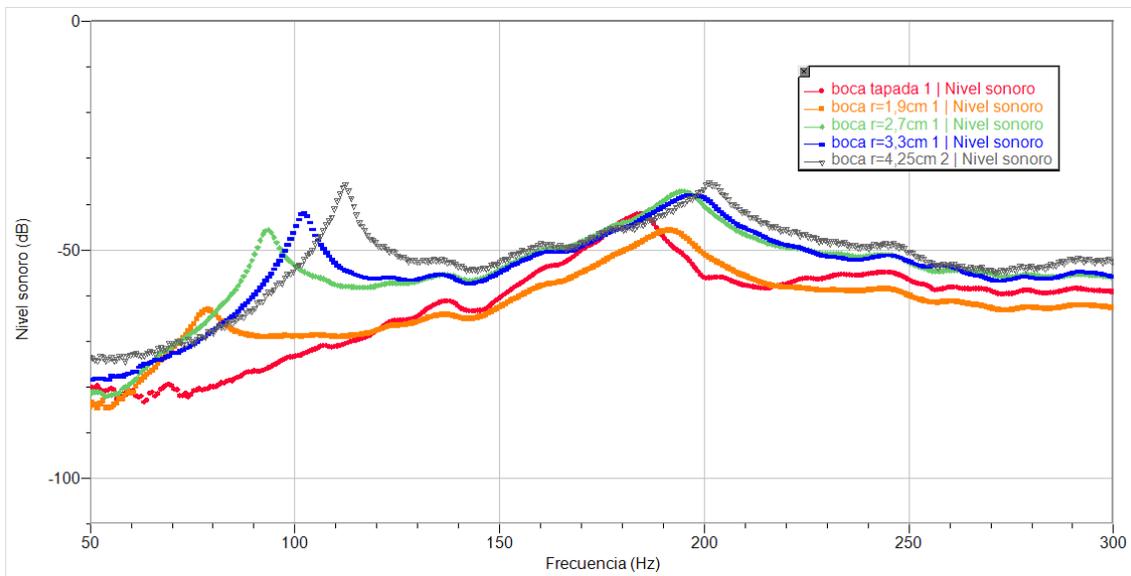


Figura 4.53. Niveles sonoros en función de frecuencias para el sonido emitido por una caja de guitarra inmovilizada, para cuatro radios diferentes de la boca y para la boca tapada.

A medida que se agranda el tamaño de la boca se observa la aparición y luego el corrimiento del primer pico hacia frecuencias mayores, lo que se cuantifica en la segunda columna de la tabla 4.8. El segundo pico tiene una deriva también, aumentando la frecuencia, con valores que se muestran en la tercera columna de la tabla. En lo que refiere al comportamiento en las ordenadas, estos resultados muestran que a medida que aumenta el radio de la boca, hay un aumento de la sonoridad media del instrumento.

Radio de la boca (cm)	f. (Hz)	f ₊ (Hz)
0	no presente	184
1,9	79	191
2,7	94	195
3,3	102	197
4,25	112	202

Tabla 4.8. Frecuencias asociadas a los dos primeros picos del nivel sonoro del sonido emitido por una caja de guitarra, al variar el radio de la boca.

17 - Tornavoz en la boca de una guitarra

¿Podemos cambiar la respuesta a los graves de una guitarra sin desmontarla?

Una modificación posible a la boca de una guitarra es adicionarle un tornavoz¹¹¹. En nuestro caso el primer artefacto se construyó como un tubo papel de 6 cm de alto, de forma que la boca de la guitarra “se proyecta” hacia el interior de su caja. La figura 4.54 muestra una imagen de nuestro tornavoz montado sobre la boca de un cuerpo de guitarra.



Figura 4.54. Tornavoz fijado a la boca de una guitarra.

En referencia al tornavoz dice Daniel Friederich: “Este dispositivo tuvo mucho éxito, principalmente en España durante unos cien años y se dejó de emplear hacia 1940. El musicólogo Emilio Pujol en su método «Escuela razonada de la guitarra» (1933) indica que sirve para acentuar los graves. Esta afirmación será confirmada por Charles Besnainou del Laboratorio de acústica musical de la Universidad de París VI: “un tubo ligero de 60 mm, del diámetro de la boca de una guitarra (85 mm aproximadamente) se fija en el interior, alrededor de la boca. El efecto resultante es una baja sensible de la primera frecuencia grave de resonancia de la tapa, que pasa de 220 Hz a 212,5 Hz, y más neta aún, una baja en la frecuencia de Helmholtz, ..., que pasa de 120 Hz a 102,5 Hz, lo que modifica la percepción del ataque de las notas.

Además, la banda de frecuencia entre esos dos picos de resonancia gana claramente de 6 a 10 dB, lo que refuerza e iguala los bajos del instrumento.” (Friederich, 2013)

¹¹¹ Antonio de Torres por ejemplo lo utilizó en las guitarras correspondientes a su primera época (FE).

Tornavoz inserto en la boca de una guitarra con su caja libre

Los resultados que mostramos aquí se obtuvieron mediante el software Visual Analyser. Se ha percutido la tapa de la caja de una guitarra en varios lugares y se ha capturado el sonido emitido de forma que el software integra la información registrada. La misma se muestra (figura 4.55) también en un plano armónico, para el caso en que la guitarra no tiene el tornavoz adicionado (círculos rojos) y para el caso en que se ha agregado el tornavoz (triángulos azules)

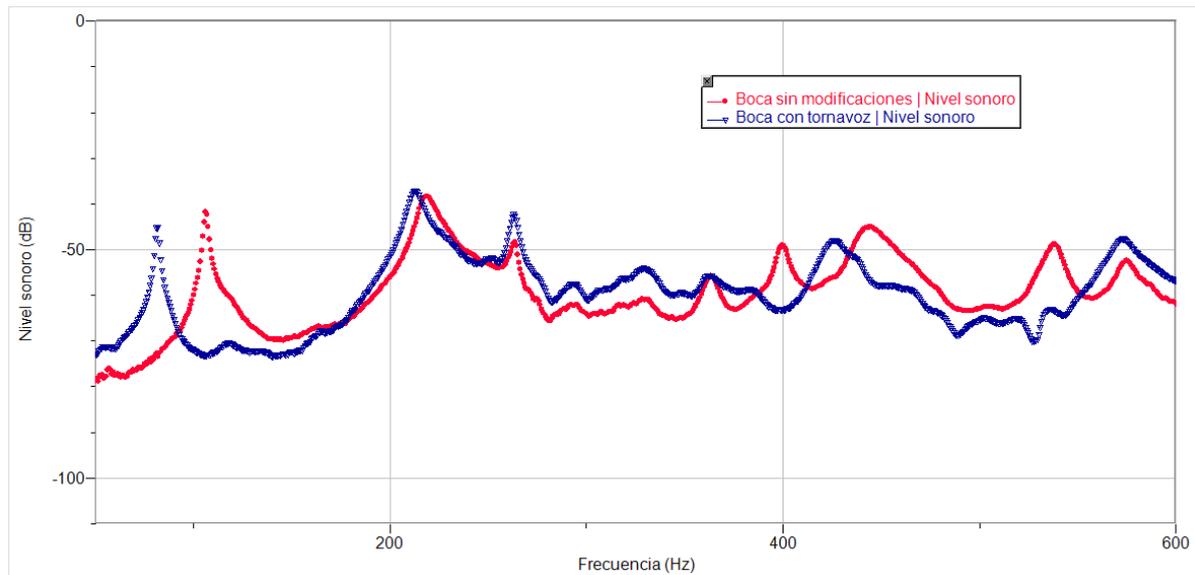


Figura 4.55. Sonido emitido por el cuerpo de una guitarra con la boca sin modificaciones (círculos rojos), con un tornavoz adicionado a la boca (triángulos azules).

En el resultado que mostramos, en un rango de baja frecuencia, se destacan los siguientes aspectos en una mirada comparativa: el “primer pico” para el tornavoz colocado se desplaza hacia las frecuencias más bajas, en relación a cuando no está montado el mismo (pasa aproximadamente de 106 Hz a 82 Hz); el “segundo pico” tiene un corrimiento de igual signo y menor tamaño (aproximadamente pasa de 219 Hz a 213 Hz), permaneciendo incambiada la ubicación en frecuencias del tercer pico, en torno a 264 Hz (si existe un cambio está por debajo de 1 Hz).

Si tomamos este resultado conjuntamente con el que obtuvimos al tapan la boca del instrumento, parece plausible pensar que el “primer pico” está asociado a las oscilaciones del aire en la cavidad abierta por la boca.

El modelo de dos masas (oscilaciones de la tapa y del aire de la caja abierta como cavidad de Helmholtz, con aros y fondo rígidos) prevé la aparición de dos máximos, picos o resonancias que asociamos a frecuencias denominadas f_1 y f_2 . Ninguna de ellas coincide ni con la frecuencia fundamental de oscilación de la tapa (respaldada por la cavidad) f_p ni con la frecuencia f_h de Helmholtz de la cavidad abierta por la boca, sino que ambas son la consecuencia del acoplamiento entre dichas oscilaciones. En esta observación (que se realizó dejando al fondo vibrar por lo cual no estamos estrictamente en las condiciones del modelo) se puede observar que el tornavoz produce una notable disminución de f_1 (si bien f_2 también se ve disminuida esto se observa en una proporción muy menor).

Tornavoz inserto en una guitarra con su caja inmovilizada

De forma similar a como planteamos la actividad anterior, hemos sumergido a la caja de la guitarra en un recipiente con arena, con el objetivo de inmovilizar los aros y el fondo del cuerpo. El resultado del sonido emitido, procesado también con *Visual Analyser*, se muestra en la figura 4.56 y los resultados en frecuencias más relevantes se indican en la tabla 4.9.

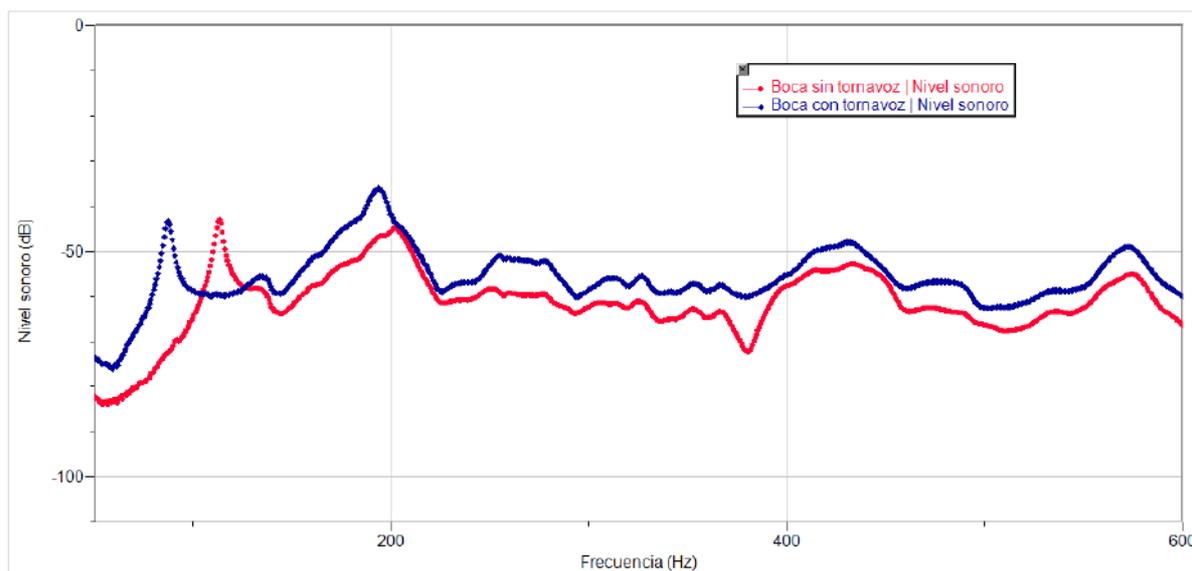


Figura 4.56. Sonido emitido por una caja de guitarra con su fondo y aros inmovilizados cuando no hay un tornavoz colocado (círculos en rojo) y cuando hay un tornavoz inserto en la boca (rombos en azul)

Situación	Frecuencia “pico 1” (Hz)	Frecuencia “pico 2” (Hz)
Sin tornavoz	106	219
Con tornavoz	82	213
Sin tornavoz, en arena	114	202
Con tornavoz, en arena	87,5	194

Tabla 4.9. Resumen de las frecuencias de los primeros dos picos del sonido emitido por una guitarra al colocarle un tornavoz, cuando se encuentra en el aire o inmovilizados aros y fondo mediante la “inmersión” en arena.

Tornavoz de alto ajustable en una caja inmovilizada

Los resultados anteriores se ven confirmados en un nuevo experimento en el que se ha colocado un tornavoz cuya altura se puede ajustar. La figura 4.57 muestra al objeto que opera como tornavoz en esta sección (a) y al mismo insertado en la boca del instrumento que se encuentra inmerso en arena (b) como en el caso anterior.

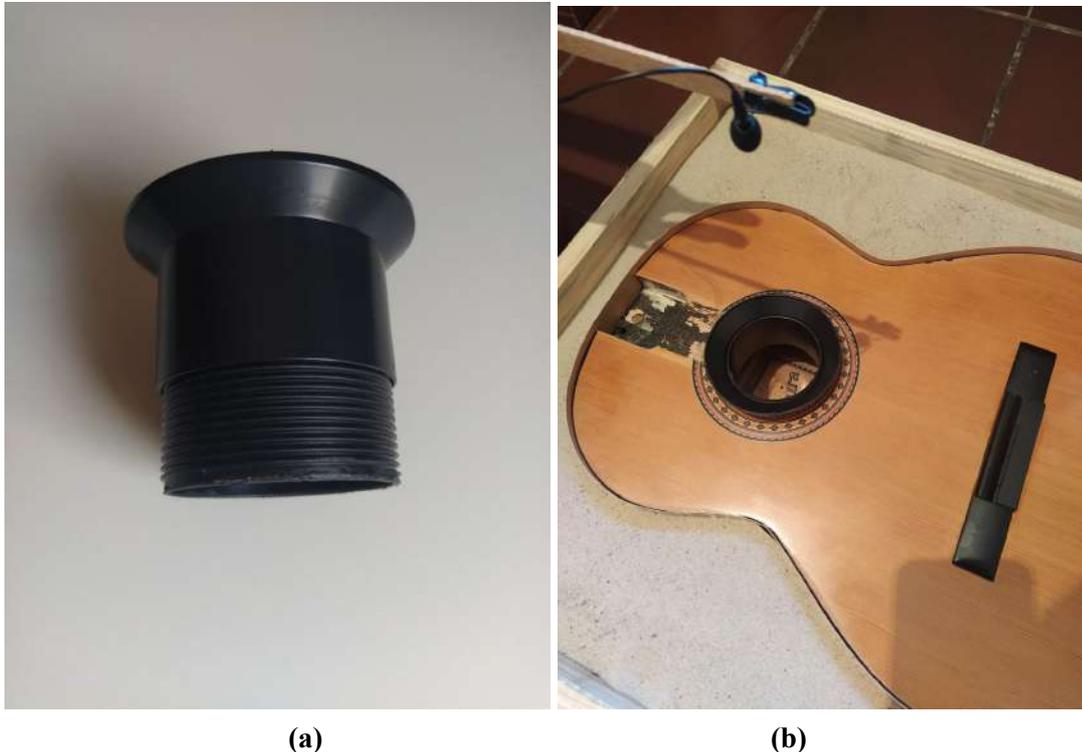


Figura 4.57. Tornavoz de largo ajustable. Objeto que cumple la función (a) y (b) caja con tornavoz insertado en la boca.

Las imágenes muestran las diferencias geométricas de la forma de este tornavoz: tiene un diámetro aproximadamente 1 cm menor que el presentado en primera instancia, su terminación es tipo cono truncado (a diferencia del primero que puede considerarse tipo pestaña). Además, agrega una masa apreciable a la tapa, cosa que nuestro tornavoz de papel no generaba. Estos aspectos acotan las comparaciones con los primeros datos.

Los resultados para dos alturas: 5 cm (círculos azules), y 8 cm (cuadrados verdes), en contraste con la boca sin tornavoz (triángulos rojos), para un rango más acotado en frecuencias (entre 50 Hz y 400 Hz), se ven en la figura 4.58.

En relación al pico de frecuencia más baja el corrimiento observado en esta situación es consistente con el propuesto en la representación binaria (sin y con tornavoz), y algo similar ocurre con el segundo pico. Un corrimiento hacia las bajas frecuencias se confirma especialmente en el caso del primero.

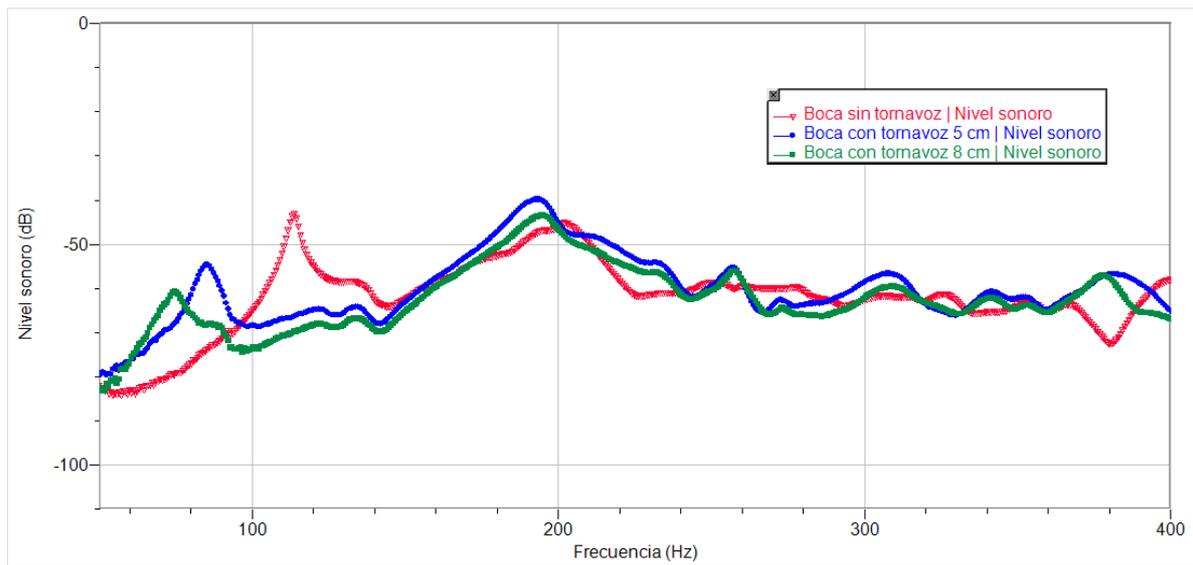


Figura 4.58. Sonido emitido por una caja de guitarra con su fondo y aros inmobilizados para dos alturas de tornavoz (en azul y verde) en relación a cuando el mismo no está presente (rojo).

Un aspecto que queda pendiente de análisis es el comportamiento del nivel sonoro medido cuando se agrega un tornavoz a la boca de una guitarra. Nuestros resultados parecen indicar respuestas contradictorias (el gráfico de la figura 4.56 indica un aumento del nivel sonoro medio al colocar el tornavoz, y el de la figura 4.58 indica una situación opuesta), pero hay que tener presente que en estos experimentos hay una variable que no ha sido controlada: la percusión no ha sido producida en condiciones normalizadas.

18 - Tapa armónica con sticker

¿Has visto guitarras con su tapa “tuneada”? ¿sonarán distinto?

Mencionamos en la sección *Guitarra: Modelos de baja frecuencia* el modelado de la caja de una guitarra mediante una analogía mecánica, como forma de entender el comportamiento de la emisión sonora del instrumento a bajas frecuencias. Esos modelos permiten pensar en las eventuales modificaciones que se produzcan en el sonido emitido al agregar cargas másicas a algunos de los componentes de la caja. En la figura 4.59 mostramos los resultados comparativos entre el sonido emitido por una caja libre¹¹² (en la cual el fondo puede vibrar) sin aditivos y el emitido al fijar una masa de aproximadamente 50 g a la tapa, sobre el puente.

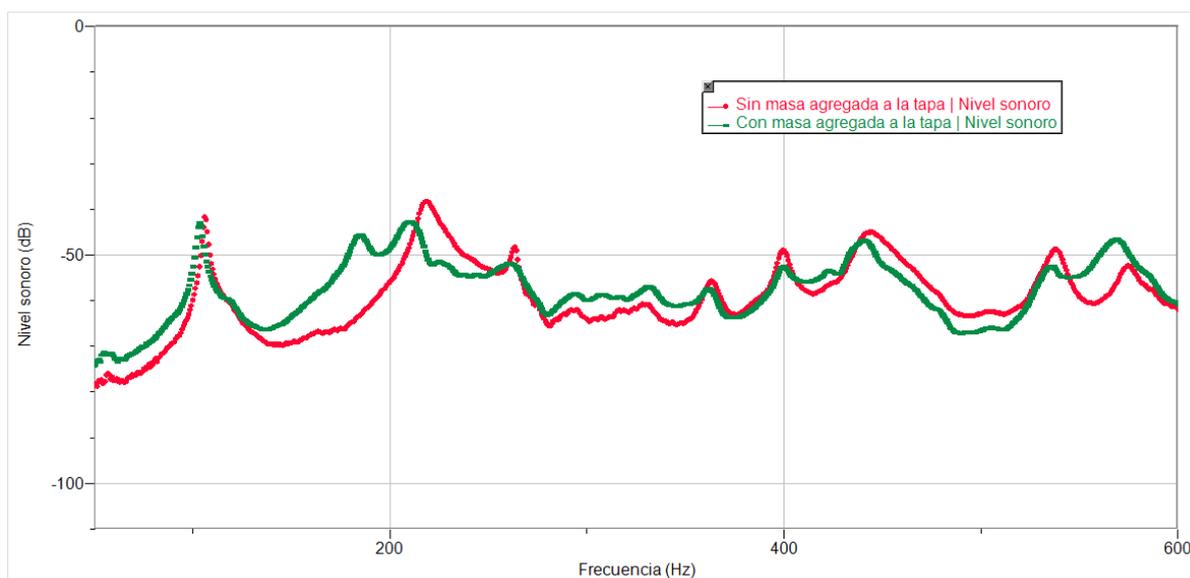


Figura 4.59. Sonido emitido por la caja de una guitarra libre, sin agregados (círculos rojos) y con una pequeña masa agregada a la tapa sobre el puente (rectángulos verdes).

Destacamos los siguientes aspectos en una mirada comparada de ambos resultados: el primer pico permanece sin cambios apreciables al agregar masa a la tapa; en relación al segundo pico del gráfico original encontramos dos aspectos a resaltar: hay una deriva a la baja y un desdoblamiento a los valores de frecuencia que se registran en la tabla 4.10; el tercer pico (en el entorno de los 264 Hz) permanece en la ubicación original.

Situación	Frecuencia “pico 1” (Hz)	Frecuencia “pico 2” (Hz)
Sin masa agregada	106	219
Con masa agregada, de 50g	104	185/211
Sin masa agregada, en arena	114	202
Con masa agregada de 56g, en arena	108	168

Tabla 4.10. Frecuencias asociadas a los dos primeros picos sonoros sin y con masas agregadas a la tapa armónica.

¹¹² Un modelo adecuado a esta situación requiere considerar tres osciladores acoplados.

En el gráfico de la figura 4.60 se muestra el nivel sonoro en función de la frecuencia para una caja de guitarra inmovilizada, a la que se le adiciona un cuerpo de masa 56 g a la tapa armónica (cuadrados en verde), y la referencia (círculos en rojo) corresponde a una situación análoga sin el cuerpo adherido.

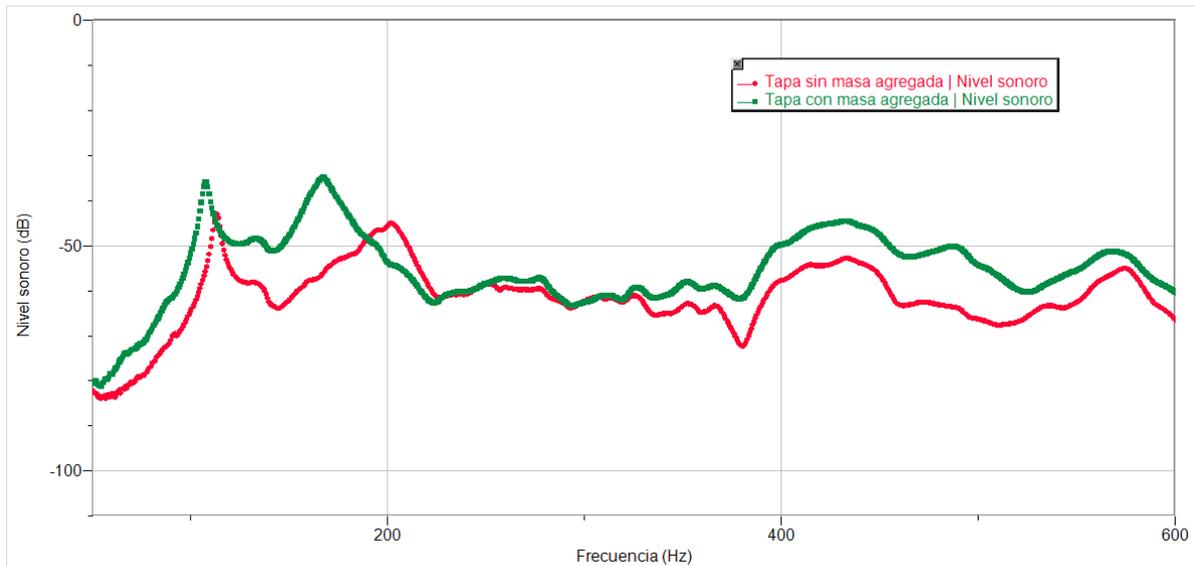


Figura 4.60. Nivel de sonido emitido con caja inmovilizada, cuando no se adiciona masa a la tapa armónica (círculos en rojo) y cuando se agrega un cuerpo de masa 56 g sobre el puente (cuadrados en verde).

Aspectos que destacamos de este resultado refieren a un corrimiento hacia bajas frecuencias del segundo pico, que es más pronunciado que el correspondiente al primer pico. Adicionalmente, al inmovilizar la caja no se encuentra el desdoblamiento del segundo pico que encontramos en el gráfico de la figura 4.59.

19 - Con la mochila cargada

¿Todo cambia cuando cargo el fondo de una guitarra?

La información que se representa en forma de gráficos (figura 4.61) muestra el nivel sonoro en función de la frecuencia para el sonido radiado por una guitarra, colectado con un micrófono en un punto del espacio, y una tarjeta de sonido de PC, controlados por el software *Visual Analyser*. Las representaciones en tonos rojizos corresponden a tres pruebas independientes en las que la caja de una guitarra se encuentra libre de vibrar en todas sus partes, sin aditivos. Las que se muestran en tonos de azul corresponden a tres pruebas independientes que se realizaron adhiriendo un cuerpo de masa 157 g al fondo de la caja. Optamos por mostrar la información en intervalos de frecuencias donde se observa sólo el primer pico sonoro (arriba izquierda), sólo el segundo pico sonoro (arriba derecha), picos que aparecen entre los 400 Hz y 450 Hz (abajo izquierda), y los que se desarrollan en el entorno de los 550 Hz (abajo derecha).

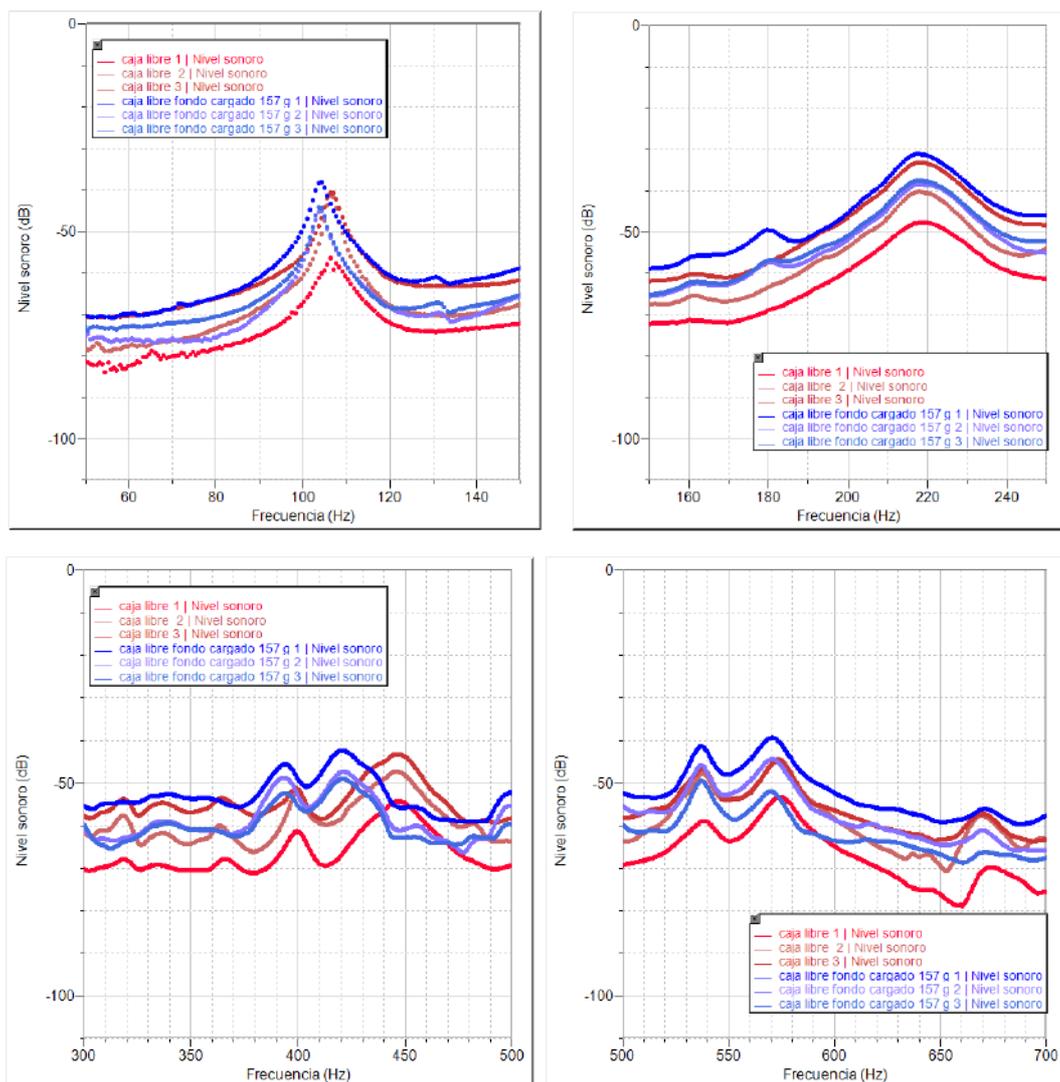


Figura 4.61. Nivel sonoro en función de la frecuencia para el sonido que emite una caja de guitarra libre (tonos rojizos), y para el que radia cuando se adhiere una masa de 157 g al fondo (azul). Intervalo de frecuencias entre 50 y 150 Hz (izquierda arriba), entre 150 y 250 Hz (derecha arriba), entre 300 y 500 Hz (izquierda abajo) y entre 500 y 700 Hz (derecha abajo).

La información de la ubicación de los picos en el eje de frecuencias se sintetiza en la tabla 4.11. La misma destaca en la segunda y tercera fila los valores promedio de las tres pruebas independientes para el fondo sin carga y el fondo cargado, respectivamente. La última fila contiene los “corrimientos” que se identifican en cada frecuencia entre las dos situaciones analizadas.

Frecuencias de picos	f1 (Hz)	f2 (Hz)	f3a (Hz)	f3b (Hz)	f4a (Hz)	f4b (Hz)
fondo sin carga	106,3	218,2	399,2	446,6	537,9	573,9
fondo con carga	105,0	218,0	393,5	420,8	537,0	570,4
Corrimiento en frecuencia	-1,3	-0,2	-5,8	-25,8	-0,9	-3,5

Tabla 4.11. Frecuencias a las que se observan los primeros picos en el nivel sonoro de una caja de guitarra libre y adhiriendo una masa al fondo de la misma. En la última fila se muestran los corrimientos que se calculan al pasar del primer caso al segundo.

Observando los resultados del “corrimiento en frecuencia”, y asumiendo que la incertidumbre promedio en este proceso de medida no supera 1 Hz, destacamos en el rango de 50 Hz a 700 Hz:

Todos los corrimientos apreciables se dan hacia las frecuencias más bajas, al adicionar masa al fondo:

- El corrimiento más notorio que se observa le corresponde al pico 3 (asumiendo que se trata de un doblete), en particular el corrimiento de “3b” casi cuadriplica al correspondiente al “3a”.
- El desplazamiento que le sigue en términos absolutos es el del pico 4, destacándose el “4b”. No puede afirmarse que sea significativo el corrimiento de “4a”.
- El segundo pico no presenta corrimiento apreciable.
- El primer pico parece mostrar un corrimiento pequeño hacia las bajas frecuencias.

En síntesis, aumentar la masa del fondo¹¹³ del instrumento produce cambios en las curvas de respuesta de la caja del instrumento. Estos cambios permiten al constructor de guitarras ajustar estas características para mejorar la performance del instrumento, o para evitar algunos comportamientos no deseados de la emisión del mismo, como se desarrolla en la actividad 20.

¹¹³ Esta afirmación cualitativa vale también para la tapa, como se mostró en la actividad 18.

20 - Danza con lobos: sobreacoplamientos entre las cuerdas y el instrumento

¿Se pueden oír lobos cuando suena una guitarra?, ¿son deseables los sonidos lupinos?

En la sección *Formantes* nos referimos a que la excitación de las cuerdas de la guitarra produce un conjunto de oscilaciones de diversas frecuencias que luego se transmiten a la caja de resonancia (y todo el resto del instrumento) de tal forma que el sonido resultante debe analizarse como un producto complejo de la interacción entre varios osciladores. Una forma de caracterizar al instrumento armado es obtener su curva de respuesta. La misma no es plana en el sentido de que se trata de una respuesta selectiva a la frecuencia reforzando algunas de ellas y deprimiendo otras. La figura 4.62 muestra un ejemplo en el que se registró el sonido emitido por una guitarra con su encordado colocado, sus cuerdas afinadas, e integrando la información de una sucesión de golpes sobre su tapa armónica.

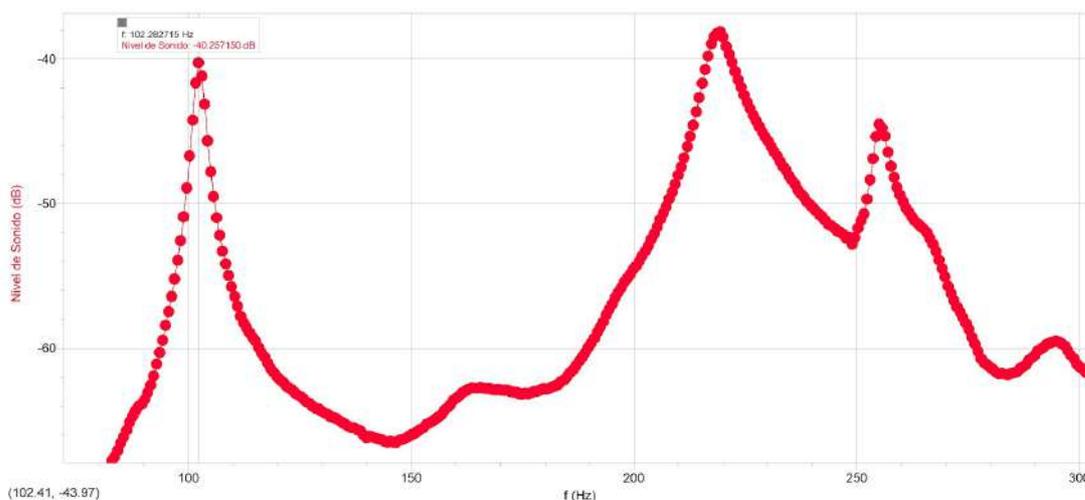


Figura 4.62. Curva de respuesta de una guitarra.

Una posible consecuencia de dicha interacción consiste en el fenómeno de sobreacoplamiento que se produce cuando existe una coincidencia entre alguna de las frecuencias de la cuerda con las resonancias del instrumento: en este caso se produce una “wolf note” (“nota lobo”¹¹⁴) que suena muy diferente al resto, se “apaga” muy rápidamente o bien genera una oscilación (“batido”) en la amplitud. Un objetivo del guitarrero será evitar que aparezcan y, si lo hacen, generar las modificaciones estructurales en el instrumento (modificar las masas o rigideces de tapa y/o fondo o el área de la boca, por ejemplo) para minimizar sus efectos o hacerlos desaparecer.

Para generar en forma artificial esta situación vamos a considerar la curva de respuesta de la figura 4.62. En ella se puede ver que la primera resonancia se produce en el entorno de los 102 Hz. Ninguna de las frecuencias fundamentales de las cuerdas en la

¹¹⁴ El fenómeno, que aparece frecuentemente en algunos instrumentos de cuerda frotada, genera un sonido similar al aullido de un lobo.

afinación estándar coincide con este valor por lo cual vamos a cambiar la tensión de la cuerda de frecuencia más próxima para simular esa situación y analizar el fenómeno. En este caso se trata de la cuerda 5ta, la cual oscila naturalmente¹¹⁵ a 110 Hz. Vamos a cambiar su afinación para hacerla oscilar a frecuencias por debajo, coincidentes y por encima del valor correspondiente a la resonancia. Los valores que se elegirán serán aquellos que presenten en la curva niveles de sonido 5, 10 y 20 dB por debajo del máximo.

Con el objetivo de producir excitaciones similares (y por lo tanto reproducibles) se colocará la guitarra en forma horizontal con un micrófono ubicado sobre ella a nivel de la boca de tal forma que los sonidos que se produzcan no saturen la entrada del dispositivo de registro (nivel máximo de entrada de audio del celular y/o computadora) y se procederá de la siguiente manera:

1. se cambiará la afinación de la cuerda 5ta hasta obtener la frecuencia deseada,
2. se alejará la cuerda 4,0 mm con respecto a su posición de equilibrio (mediante un hilo tenso fijo por sus dos extremos en forma de "V") a nivel del traste 12 ($L/2$) de tal forma que se exciten solamente los armónicos pares y la oscilación sea netamente perpendicular al puente,
3. se colocarán materiales absorbentes que minimicen la oscilación del resto de las cuerdas,
4. se ejecutarán en los dispositivos las aplicaciones y/o el software de registro y análisis,
5. se procederá a liberar la cuerda quemando el hilo con una llama y
6. se detendrán las aplicaciones y guardarán los archivos generados para su posterior análisis.
7. Se repite el procedimiento para un nuevo valor de frecuencia.

La figura 4.63 muestra el montaje utilizado.

¹¹⁵ Siempre haciendo referencia a la afinación estándar.

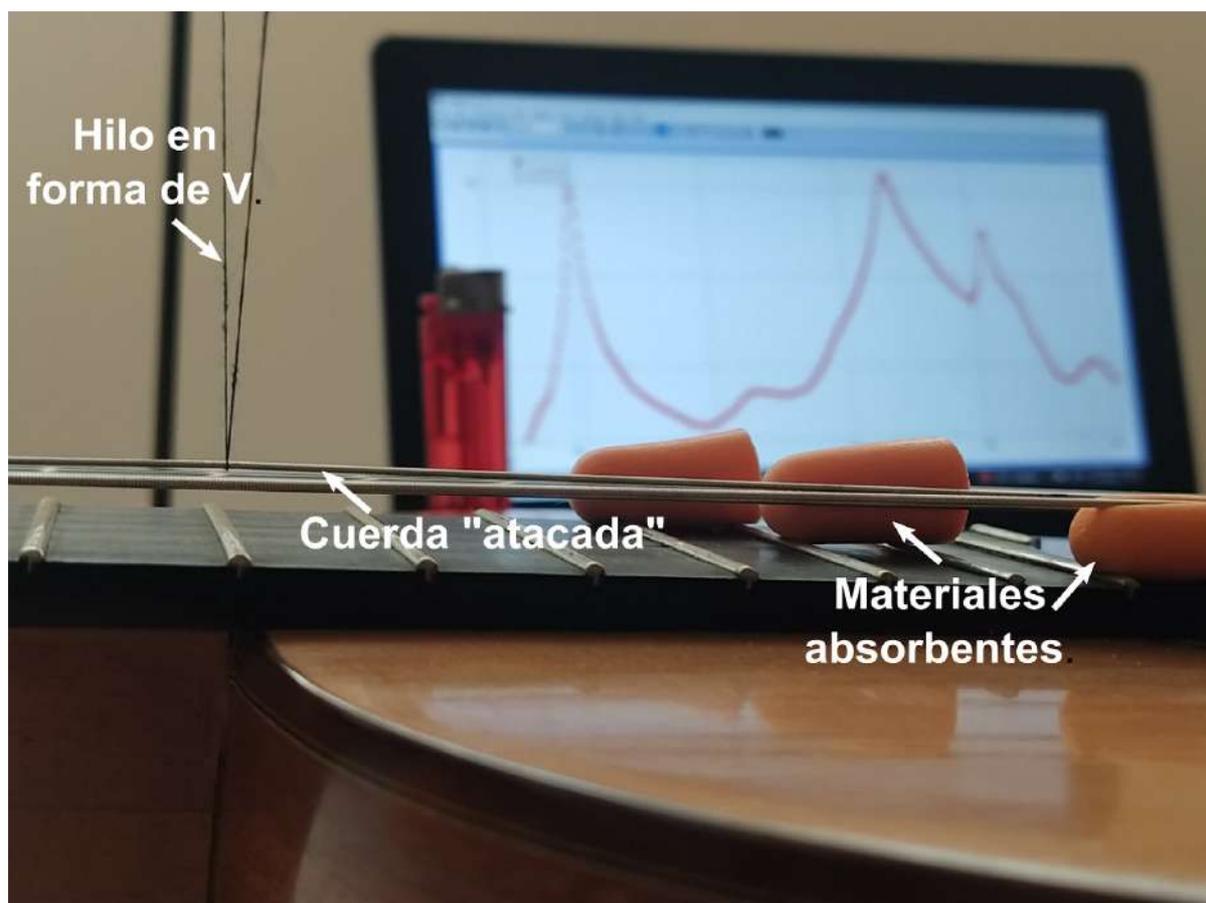


Figura 4.63. Montaje experimental para la “Danza con lobos”.

En nuestro caso utilizamos la aplicación *Tune!It Lite* (Smartphone) para obtener la afinación a las frecuencias seleccionadas, *Audacity* (computadora) para el registro del sonido producido y su exportación como *.wav* y *phyphox/Amplitud de audio* (Smartphone) para la obtención del registro del nivel de sonido en función del tiempo. Una vez obtenido este último registro se lo exportó para su posterior análisis.

Elegimos medir las tasas de decaimiento iniciales del *Nivel de Sonido en función del tiempo* para cada una de las *frecuencias* elegidas. Los resultados obtenidos se muestran en la gráfica¹¹⁶ de la figura 4.64.

Se seleccionaron puntos del comienzo de cada emisión exceptuando los iniciales (correspondientes al ataque). Los decaimientos verificaron una etapa inicial que se ajustaba a la función lineal en forma muy satisfactoria para los primeros dos segundos de duración.

¹¹⁶ Se muestran los puntos unidos mediante tramos rectos solamente con el objetivo de sugerir visualmente las características generales de un ajuste de los datos.

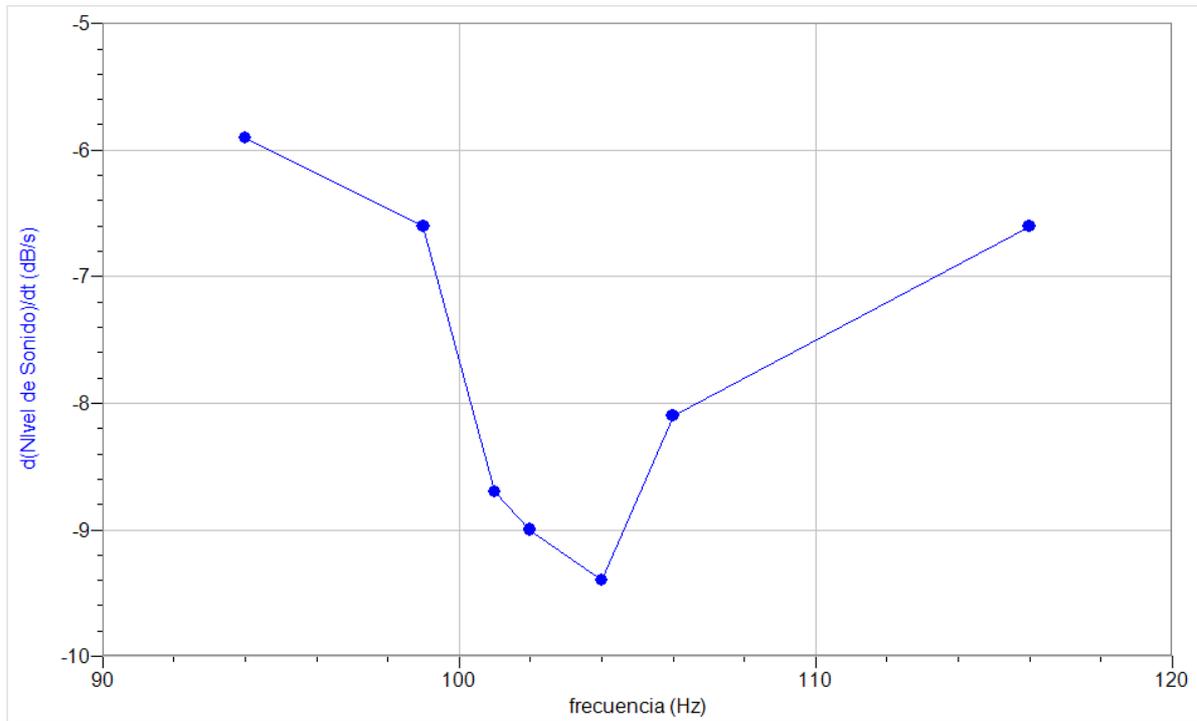


Figura 4.64. Tasa de decaimiento del *Nivel de Sonido con respecto al tiempo* en función de la *frecuencia*.

A partir de la misma se puede extraer la conclusión esperada que evidencia una tasa de decaimiento que presenta un mínimo en un entorno de valores que comprende la frecuencia correspondiente a la primera resonancia del instrumento. Esto muestra que el sonido emitido se extingue con gran rapidez, lo que evidencia un *wolf*, lo cual debe evitarse en caso de que suceda para las notas de la afinación estándar del instrumento.

Las diversas herramientas de análisis disponibles nos permiten abordajes cuali o bien cuantitativos de los cuales podemos extraer conclusiones complementarias. Ya hemos presentado la gran potencialidad de algunas de ellas. En la figura 4.65 mostramos capturas de pantalla de *Tune!It* para tres frecuencias seleccionadas.

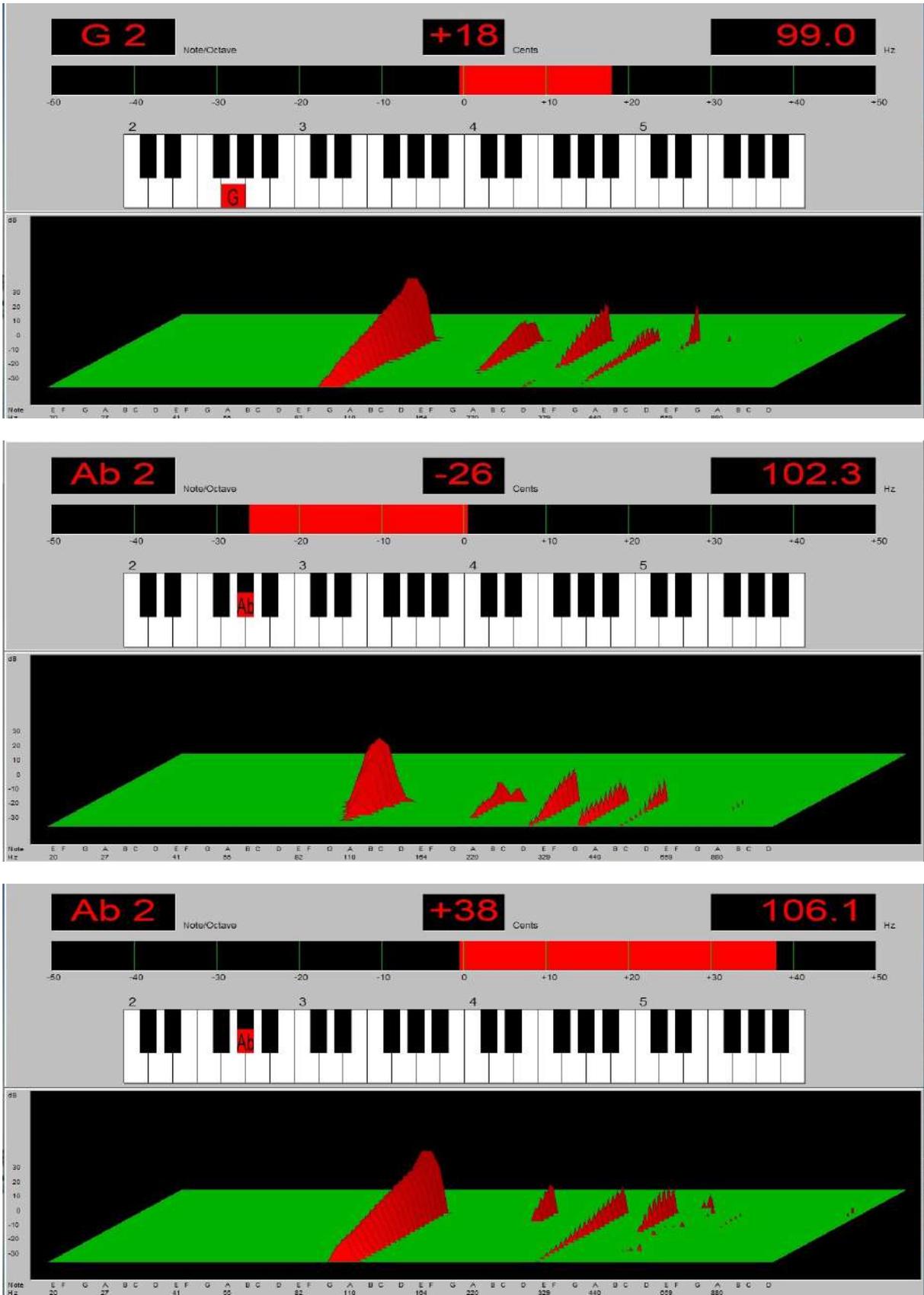


Figura 4.65. Decaimientos de tres sonidos próximos a la primera resonancia.

De las imágenes puede extraerse rápidamente que la tasa de decaimiento del sonido más cercano a la primera resonancia es notablemente mayor al resto: el armónico fundamental se extingue en muy poco tiempo.

Nota El luthier José Ramírez III relata en su libro (Ramírez III, 1990) una anécdota vinculada a las notas lobo que el célebre guitarrista Andrés Segovia habría encontrado en algunos de sus instrumentos y de los intercambios entre ambos acerca de cómo evitarlas (y si era posible hacerlo). Entre ellos aparece una afirmación que hacen varios músicos acerca de que el uso permanente del instrumento durante horas permite obtener resultados que no eran posibles al comienzo de la tarea. El maestro Ramiro Agriell, destacado guitarrista de nuestro país, lo afirma y nos lo comentó cuando nos contactamos con él por este Proyecto. Se mostró muy interesado en que fuesen estudiados este tipo de aspectos vinculados a cómo la sonoridad de la guitarra se modifica mientras se va ejecutando inclusive en un mismo día. Más adelante, en la sección 5, citamos la bibliografía encontrada con evidencia que respalda esta observación.

21 - Resonancias simpáticas

¿Podemos lograr que la cuerda de una guitarra comience a vibrar sin siquiera tocarla?

¡Sabemos que la respuesta es afirmativa!

Si una cuerda presionada en cierto espacio¹¹⁷ del diapasón y pulsada produce la misma frecuencia que otra segunda emitiría al ser pulsada al aire, esta última comienza a vibrar por *resonancia*¹¹⁸. Para poner un ejemplo, podemos probar pulsando la 6ta. cuerda en el 15vo. espacio (sol 3, G₃, 196,0 Hz) la cual pone en movimiento a la 3ra. cuerda (ya que sus frecuencias coinciden)¹¹⁹. También puede verificarse que esto sucede (aunque con menor nivel sonoro) si pulsamos la 3ra al aire mientras mantenemos la 6ta. presionada en el 15vo. espacio.

Pero ahora volvamos a la pregunta inicial, ¿es posible lograrlo con cuerdas que no produzcan la misma nota (fundamental)?

¡La respuesta sigue siendo positiva!

Para explicarlo recordemos que una cuerda fija por ambos extremos y pulsada con *uña* o *púa*¹²⁰ lejos del punto medio¹²¹ (por ejemplo cerca del puente) emite un sonido formado por la frecuencia que le da nombre a la nota emitida acompañada por varias más (sobretonos) que son múltiplos de aquella: llamamos *armónica* a la serie. En la tabla 4.12 se listan los valores de los primeros cuatro armónicos¹²² correspondientes al sonido que emite cada una de las seis cuerdas de una guitarra clásica cuando son pulsadas *al aire*.

¹¹⁷ Aquí nos referimos a la zona entre dos *trastes* del diapasón.

¹¹⁸ Estrictamente hablando cuando un agente externo excita un oscilador amortiguado, la resonancia, tal como la definimos, sucede cuando las frecuencias excitadora y natural del sistema son próximas, no coincidentes. Solo en el caso de un oscilador no amortiguado (caso ideal) las mismas coinciden. De todos modos, con sistemas con amortiguación pequeña los valores están tan próximos que vamos a considerarlos iguales para simplificar la descripción.

¹¹⁹ Cabe aclarar que se trata de una simplificación: una cuerda puede estar afinada *al aire* y perder esta condición en las notas que produce al ser presionada a lo largo del diapasón. Minimizar estas desviaciones supone una tarea de *compensación* que un buen luthier debe saber manejar.

¹²⁰ Este detalle es importante ya que al proceder de esta forma se excitan mayor cantidad de armónicos que al hacerlo con *yema*.

¹²¹ Esto permite que en la oscilación se encuentren presentes la mayor cantidad de armónicos posibles ya que al pulsar una cuerda de longitud L en un punto que la divide en N partes, desaparecen (o bien se minimizan) todos los armónicos múltiplos de N ; por ejemplo: si pulsamos en $L/5$ esto sucede para $n = 5, 10, 15$, etc.

¹²² Al pulsar una cuerda en las condiciones descritas y para guitarras como las que se describen en la "Nota" (más adelante) pueden excitarse más de 15 armónicos, pero los superiores decaen rápidamente. Es por eso que incluimos solo estos primeros 4 a modo de ejemplo.

Nº cuerda	Nota	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)
6	E ₂	82.4	164.8	247.2	329.6
5	A ₂	110.0	220.0	330.0	440.0
4	D ₃	146.8	293.6	440.4	587.2
3	G ₃	196.0	392.0	588.0	784.0
2	B ₃	246.9	493.8	740.7	987.6
1	E ₄	329.6	659.2	988.8	1318.4

Tabla 4.12. Primeros cuatro armónicos de las cuerdas de una guitarra clásica.

En la tabla se destacaron en colores iguales los valores que coinciden o están próximos. Se muestra claramente con ello que existen armónicos con frecuencias comunes a cuerdas de diferentes notas fundamentales (f_1). De acuerdo a ello, si se pulsa una de ellas y luego se la detiene, podrá escucharse claramente que otra/s queda/n sonando ya que la/s que comparte/n valor/es coincidente/s (o muy próximos) comenzará/n a vibrar: para observar claramente el fenómeno deben silenciarse el resto de las cuerdas.

Al fenómeno se lo conoce como *resonancias simpáticas*.

A modo de ejemplo: si se pulsa la 6ta. cuerda *al aire*, su cuarto armónico ($f_4 = 329,6$ Hz) excita el primer armónico de la cuerda 1ra. ($f_1 = 329,6$ Hz) y el tercer armónico de la cuerda 5ta. ($f_3 = 330,0$ Hz) por lo cual al detener todas las cuerdas menos estas últimas (por separado) se escucha claramente el armónico excitado (además de otros que invitamos al lector a explorar). Como si lo anterior fuese poco, el escucha atento podrá verificar que la 6ta. cuerda pulsada al aire también excita, a través de su tercer armónico ($f_3 = 247,2$ Hz), al primer armónico de la cuerda 2da. ($f_1 = 246,9$ Hz).

Con un nivel de sonido muy inferior con respecto a los ejemplos anteriores y solamente en guitarras de calidad media y superior, puede verificarse que la cuerda 6ta. al aire también excita a la cuerda 4ta. Dejamos en manos del lector interesado averiguar las causas de este fenómeno.

Esta prueba se hace más evidente si se pulsa una cuerda de mayor masa (densidad lineal de masa) para observar la excitación de otra de menor masa. También es más evidente entre cuerdas que compartan valores de armónicos de orden pequeño con respecto a otras que lo hagan para órdenes grandes.

La figura 4.66 es una imagen que intenta mostrar las coincidencias de forma gráfica; En la misma aparecen en abscisas las frecuencias de los primeros cuatro armónicos de cada cuerda y en ordenadas el número de cuerda. Se han agregado rectángulos rojos que explicitan los valores comunes.

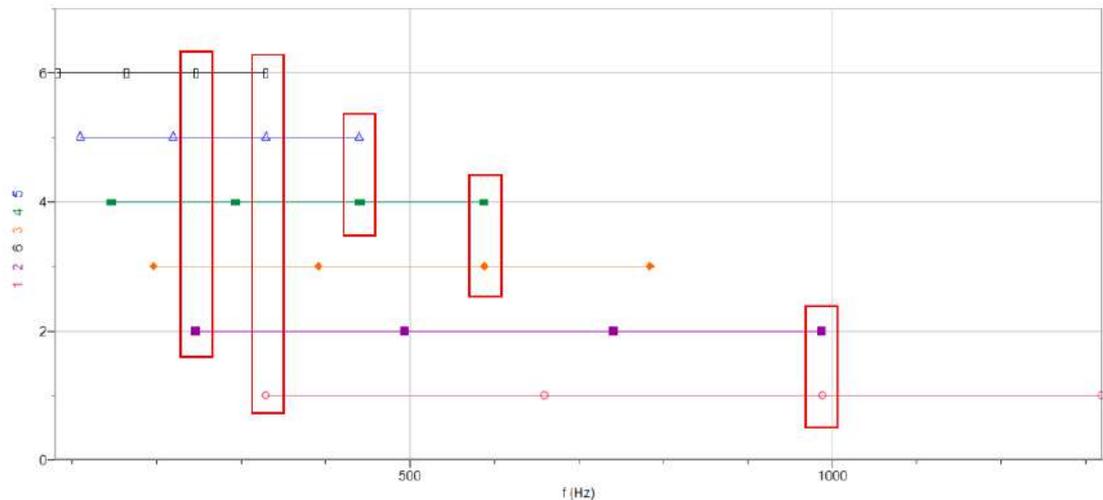


Figura 4.66. Representación gráfica de las coincidencias de armónicos

Las resonancias simpáticas en la construcción de instrumentos musicales

A lo largo de la historia se han fabricado gran variedad de instrumentos de cuerda que buscan enriquecer su sonido agregando cuerdas que oscilan por *simpatía* cuando las que se pulsan, frotan o percuten son excitadas. En la India existen muchos ejemplos.

El caso extremo es el del *sarangui* que tiene 3 cuerdas que se frotan con un arco y hasta 37 que vibran por *simpatía* con aquellas.

Nota: Es importante destacar que para que se produzcan y observen tanto la *resonancia* como las *resonancias simpáticas* los acoplamientos *cuerda-instrumento* y *cuerdas entre sí* deben ser óptimos lo cual sucede si se verifican las siguientes condiciones:

- que la guitarra se encuentre afinada perfectamente para probar las *resonancias simpáticas*, y produzca la nota afinada al pulsar la cuerda que es presionada en cierto espacio para probar la *resonancia*.¹²³
- que la guitarra sea de la máxima calidad posible (como mínimo que la tapa sea fabricada en madera de resonancia¹²⁴ maciza con un espesor del orden de los 2 mm).
- que las cuerdas sean de buena calidad, nuevas y limpias.
- que el instrumento se haya guardado en un ambiente libre de excesiva humedad (al menos por debajo del 60 %).
- que la guitarra se use habitualmente y el día de la prueba durante un tiempo razonable.

No obstante, y para que estas observaciones fueran repetibles para la mayor cantidad de condiciones existentes, todo lo que se relata y describe aquí fue probado en

¹²³ Esto es para estar seguros que el instrumento afina a lo largo de todo el diapasón, algo que no siempre sucede y menos en aquellos de baja calidad o deformados.

¹²⁴ El término "madera de resonancia" se refiere a las especies que la luthería ha elegido históricamente para fabricar los instrumentos de calidad.

una guitarra fabricada en contrachapado de madera con cuerdas que tenían bastante uso y que no se usa habitualmente. De esta forma nos aseguramos que cualquiera que lo desee puede repetir estas observaciones en el instrumento que consiga.

A modo de ejemplo mostramos en la figura 4.67(a) el plano armónico de dicha guitarra cuando se pulsa la cuerda 1ra. con púa en un punto cercano al puente y en (b) cuando se la pulsa con yema en el mismo punto.

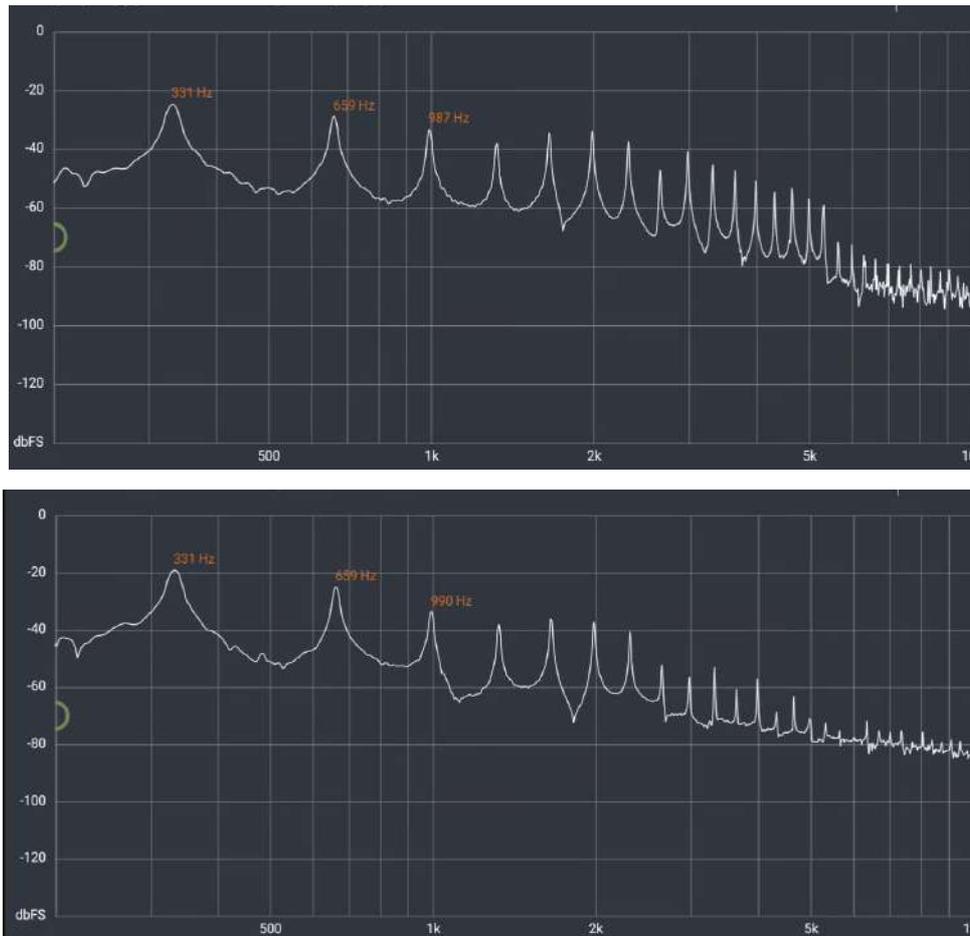


Figura 4.67. Plano armónico de cuerda 1ra. pulsada: (a) con púa cerca del puente y (b) con yema en el mismo punto.

En la figura 4.67 se aprecia claramente que al usar la púa (a) se excitan, al menos, los primeros 16 armónicos considerando solamente *Niveles de sonido* entre -60 y 0 dB, mientras que al usar yema (b) se excitan únicamente 11. Si bien la pulsación no fue normalizada, puede arriesgarse un acercamiento cualitativo a la diferencia que se aprecia al escuchar los sonidos: si bien los primeros tres armónicos tienen presencias similares en ambos casos, el resto de ellos presentan niveles francamente menores en el segundo.

Obviamente el tema merece un tratamiento más controlado para sostener estas u otras conclusiones.

22 - Matando sobretonos

¿“Viendo” el sonido (algo de por sí extraño) emitido por una guitarra, será posible saber en qué lugar fue pulsada la cuerda?

Los sonidos emitidos por una guitarra al pulsar una de sus cuerdas tienen una composición en frecuencias en la que los sobretonos son armónicos: las frecuencias visibles en un plano armónico se ven igualmente espaciadas¹²⁵. En esta actividad nos centramos en la composición de ese sonido complejo, habilitados por las tecnologías disponibles ampliamente que permiten calcular muy rápidamente Transformadas de Fourier que, como sabemos, devuelven frecuencias presentes en la señal y sus respectivas amplitudes.¹²⁶

Una de las preguntas que podemos hacernos es *¿cómo lograr una composición “densa” de armónicos superiores?* En algunas ocasiones los ejecutantes expertos deciden darle ese carácter al sonido, para lo cual deben pulsar la cuerda en un lugar cercano al puente. La imagen de la figura 4.68 muestra el plano armónico del sonido emitido por una guitarra al pulsar su cuerda primera¹²⁷ en esa zona mediante una púa.



Figura 4.68. Plano armónico de un sonido emitido al pulsar con púa la cuerda primera de una guitarra cerca del puente (captura de pantalla de *Advanced Spectrum Analyzer PRO*).

El software devuelve la frecuencia medida para el primer pico visible: 331 Hz. Las frecuencias esperables para un sonido con parciales armónicos incluyen los valores: 662 Hz, 993 Hz, 1324 Hz, 1665 Hz, 1986 Hz, y valores superiores múltiplos enteros de la fundamental. Si el lector busca en el gráfico de la figura 4.68 para cada valor de las abscisas identificadas, al menos de forma aproximada puede encontrar un pico de nivel sonoro.

¹²⁵ Esto se ve nítido si el eje de frecuencias es lineal. Algunas herramientas, como la que usamos en esta actividad, muestran las frecuencias sobre un eje logarítmico.

¹²⁶ En otras actividades de este trabajo mostramos que en relación a las amplitudes de los parciales presentes juega un papel relevante la curva de respuesta de la caja del instrumento. Las frecuencias presentes en la excitación original de la cuerda se mantienen en el sonido radiado por el mismo.

¹²⁷ Encontramos que en esta cuerda se ven más claros los efectos que queremos mostrar aquí.

Una pregunta que apunta a la idea del título de esta actividad:

¿Es posible pulsar la cuerda de forma que alguno o algunos de estos picos desaparezcan de la faz del espectro?

La búsqueda puede hacerse de variadas formas. Una de ellas es guiarse por la teoría y pulsar la cuerda en lugares ubicados a las distancias " $L/2$ ", " $L/3$ ", " $L/4$ ", ... de uno de los extremos de la cuerda, siendo L el tiro de la cuerda (aproximadamente el largo efectivo entre apoyos). La figura 4.69 muestra una ampliación del plano armónico en una zona de interés, cuando la cuerda es pulsada en " $L/2$ ", que en una guitarra clásica estándar corresponde al punto de la cuerda ubicado a nivel del *traste* 12, donde se encuentran el brazo y la caja del instrumento.

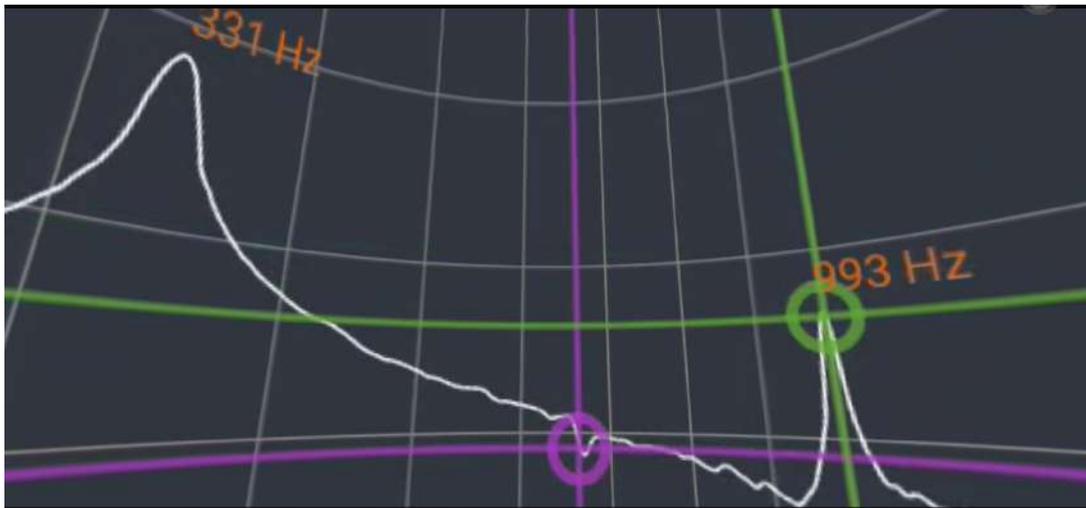


Figura 4.69. Vista ampliada del sector de interés del plano armónico del sonido de una guitarra al pulsar una de sus cuerdas en su centro.

En la figura 4.69 se destacan el primer pico (ubicado en 331 Hz), un "tercer pico" (en 993 Hz), y notoriamente la ausencia del pico ("segundo") identificable en la representación del sonido pulsado cerca del puente. Sintetizando: al pulsar la cuerda prima en su centro el sonido emitido por el instrumento no incluye el pico que corresponde al primer sobretono o segundo armónico (aproximadamente 660 Hz) y (algo que no mostramos en esta figura) tampoco se observan (o están muy deprimidos) los sobretonos que son múltiplos pares del modo fundamental.¹²⁸

Este fenómeno puede observarse con la claridad que aparece aquí, en alguna de las otras posiciones mencionadas arriba. A modo de ejemplo complementario mostramos en la figura 4.70 el espectro del sonido al pulsar la cuerda primera a una distancia " $L/3$ " del extremo de la cuerda que se fija al puente.

¹²⁸ Un planteo desde la teoría puede verse en el apartado *Modos normales de una cuerda fija en ambos extremos*. La figura 1.7 muestra el espectro de este sonido en un intervalo amplio de frecuencias.

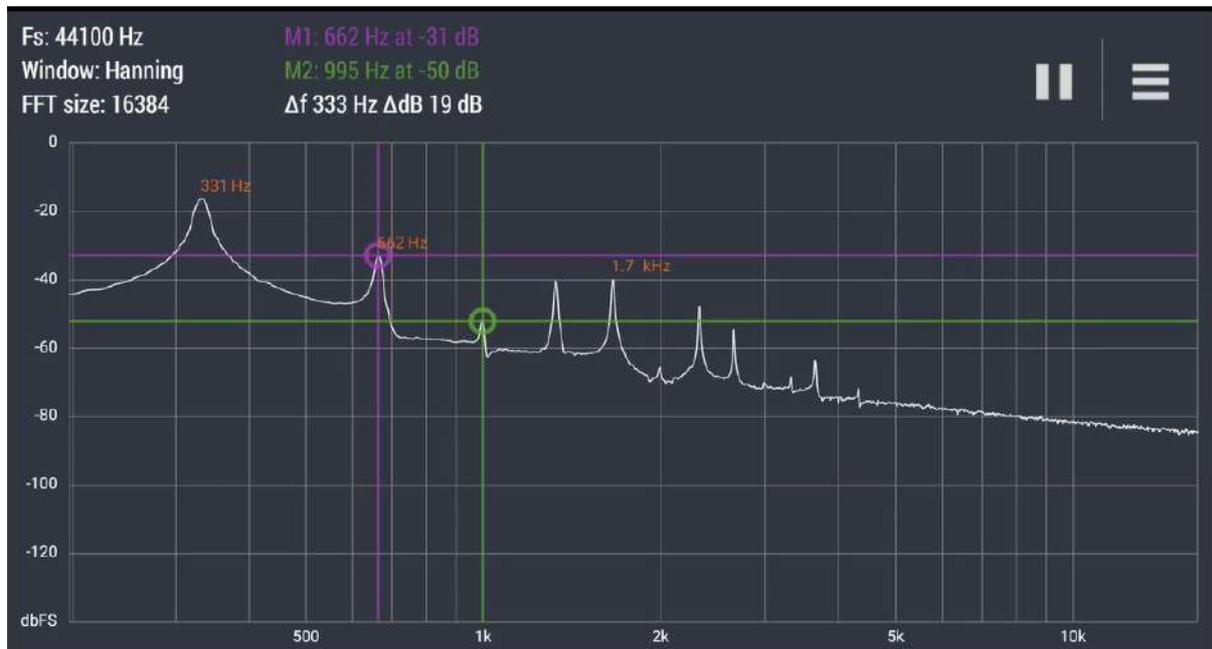


Figura 4.70. Plano armónico del sonido emitido por una guitarra al pulsar la primera cuerda en un punto ubicado en “ $L/3$ ”.

Observamos en el resultado mostrado el achicamiento notorio del tercer pico (su ubicación destacada en verde). De forma complementaria, si observamos en las frecuencias que son múltiplos de la que corresponde al “pico ausente” nos encontramos con situaciones similares: un franco achicamiento en relación a sus vecinos contiguos, y también en relación al aspecto del espectro de la figura 4.68. De modo que, pulsar la cuerda en “ $L/3$ ” genera un sonido en el que se identifican muy menguados a los picos que son “ $3n$ ” múltiplos de la fundamental.

Los resultados anteriores se explican usualmente por el siguiente aporte de la teoría: si excito una cuerda vibrante en un punto en el que un *modo normal n -ésimo* tiene un nodo de vibración (a modo de ejemplo, el modo 2 tiene un nodo en el centro de la cuerda) ese modo no puede estar presente en la oscilación compleja de la cuerda. La frecuencia que le corresponde al modo “agredido” no estará presente en el sonido radiado por la guitarra.¹²⁹

Compartimos en el enlace de la figura 4.71 siguiente un video de prueba desde el que se extrajeron las tres capturas de pantalla mostradas.



[Figura 4.71 Enlace a video “Matando sobretonos”](#)

¹²⁹ La desaparición completa no siempre es posible en la práctica, hasta donde hemos indagado.

5

Epílogo

Algunos índices (¿migas de pan?) a tener en cuenta al concebir una guitarra

... ¡Hacer una guitarra es incluso parte del plan de estudios en muchas escuelas secundarias! ... Cabe recalcar que, aunque fabricar una guitarra siguiendo las instrucciones dadas en este libro (“Make your own Spanish Guitar”) es fácil (comparativamente hablando) para un hombre acostumbrado a trabajar la madera, ... el producir un instrumento comparable a las guitarras finas existentes ... está lejos de ser una tarea sencilla.

Aparte de la selección experta de las diversas maderas utilizadas en su fabricación, la elaboración de una guitarra realmente sobresaliente (sobresaliente en artesanía y cualidades tonales) es generalmente el resultado de la experiencia adquirida por el luthier, en la mayoría de los casos, durante muchos años de práctica en la construcción de innumerables instrumentos.

A.P. Sharpe (1957)

...creo que, sin desconocer la preciosa herencia de siglos, el luthier debería volverse más consciente de la ciencia de su instrumento, y que el físico acústico debe ver que aquí hay un verdadero desafío a su disciplina. Realmente deberíamos aprender a fabricar instrumentos consistentemente mejores que los que hicieron los antiguos maestros. Si ese desafío no puede cumplirse, deberíamos al menos averiguar las razones de nuestras limitaciones.

Carleen Maley Hutchins (Hutchins, 1962)

Cada pieza de madera, incluso dentro de la misma especie, tiene una propiedad que debe ser descubierta. Se necesita habilidad para crear un sonido muy cálido y suave, lleno de carácter, pero con suficiente oscuridad mientras proporciona opacidad en los acordes, con múltiples notas superpuestas... No existe la guitarra que todo lo puede (no se pueden pedir las cualidades de una “morena” y una “rubia” en un solo instrumento), y el luthier tendrá que aceptar un compromiso, ...

Cabe señalar que no se puede modificar ninguna parte de la guitarra sin cambiar algún aspecto de su respuesta, el sonido de la guitarra, para bien o para mal. Es necesaria una observación extremadamente cuidadosa para poder avanzar. Finalmente, es responsabilidad exclusiva del constructor tomar las decisiones. Debe estar dotado de la capacidad de síntesis y de una fuerte sensibilidad artística. No existe una “clave secreta” para concebir, para crear una guitarra; hay miles de cosas que saber. No hay “trucos” milagrosos, sólo experiencia, mucha experiencia, de la que se pueden extraer observaciones, enseñanzas y soluciones.

Daniel Friederich (1977)

No existe una “fórmula” única para garantizar una buena respuesta. La calidad tonal de una guitarra no se rige simplemente por la forma del contorno o los arreglos particulares del abanico armónico; si este fuera el caso, los instrumentos serían fáciles de copiar.

Creo que la ciencia puede ayudar en el proceso de desarrollo natural mediante el aumento de la conciencia precisa acerca de los mecanismos involucrados en la producción de sonido en el instrumento. Al final del día, sin embargo, no hay sustituto para la sensibilidad del artesano hábil que ha aprendido a través de una larga experiencia cómo extraer las vibraciones requeridas de piezas de madera cuidadosamente seleccionadas y cuidadosamente formadas. Son estos creadores quienes tienen la clave para la futura prosperidad del instrumento.

Bernard Richardson (Richardson, 1994)

Las citas anteriores de músicos, luthiers y/o científicos que investigan en acústica musical intentan dar un pantallazo del difícil arte de construir una guitarra y obtener (o repetir) una buena respuesta, así como caracterizarla. Evidentemente se trata de un campo vastísimo en el cual pueden converger aportes de tan diferentes fuentes del quehacer humano como son la acústica musical, la psicoacústica, la luthería y la música.

En este trabajo intentamos introducir la física conocida por detrás de la construcción y caracterización del sonido de la guitarra española la cual involucra modelos que, si bien son exitosos en cuanto el ajuste a los datos experimentales limitados a las bajas frecuencias, distan mucho de una explicación completa. A modo de ejemplo podemos citar a Jansson (2002) quien haciendo referencia a los resultados de Antoine Chaigne afirma que *la percepción de la calidad está influenciada por las resonancias dominantes existiendo más de 15 por debajo de 1000 Hz*. Si tenemos en cuenta que los modelos aquí citados apenas explican menos de las cuatro primeras queda muy en claro que el trabajo de modelar completamente el sonido de una guitarra para todo el espectro audible está en proceso.

Por suerte, desde los comienzos de la invención de los instrumentos de cuerda pulsada y hasta hoy, los músicos en estrecha colaboración con los luthiers han avanzado en base a la experimentación y la intuición musical en la selección de materiales y en el diseño hasta obtener las guitarras que satisfacen un amplio rango de elecciones estéticas.

Ordenaremos la síntesis de conclusiones a las cuales han arribado diversos investigadores empezando por las de los físicos y terminando con las de los luthiers en la figura de Daniel Friederich en homenaje a su legado. Si bien existen tal vez tantas conclusiones como luthiers, entendemos que el caso que elegimos es una síntesis representativa de tradición y modernidad cuyos instrumentos son reconocidos por una enorme cantidad de músicos alrededor del mundo.

Uno de los primeros registros a los que tuvimos acceso en referencia a las investigaciones sistemáticas del comportamiento de maderas con el objetivo de construir guitarras clásicas es la obra del argentino Ricardo Muñoz sobre 1950; dicho autor inventó un aparato denominado *vibrografómetro* (1946) para los estudios que sintetizó en su libro

“Identificaciones vibrométricas. Maderas y sonido” y en la ya citada “Tecnología de la guitarra argentina” (Muñoz, 2015) editada originalmente en 1952.¹³⁰

Uno de los artículos fundantes de la acústica de la guitarra clásica (Christensen, 1980) nos habla de que pueden considerarse buenos aquellos instrumentos en los cuales se cumpla lo siguiente:

1. que el valor de la primera resonancia f_1 sea bajo (por ejemplo, entre 92 y 102 Hz).
2. que el factor de calidad asociado a ella Q_1 tenga un valor alto (esto significa qué tan aguda es dicha resonancia)¹³¹ y
3. que el cociente “ A/m_p ”¹³² (área efectiva de la tapa A sobre masa efectiva de tapa m_p) tome valores entre de 8.4 y 11.2 m²/Kg. La importancia de este parámetro se justifica porque la presión sonora de una guitarra es directamente proporcional a dicho cociente¹³³.

Rossing y Fletcher (2010) por su parte presentan las conclusiones a las cuales llegó Jürgen Meyer (Physikalisch-Technische Bundesanstalt en Braunschweig, Alemania) quien llevó adelante profundas y vastas investigaciones.

Algunas de las características que mostraron la mayor correlación con la alta calidad de los instrumentos fueron:

1. el nivel de sonido de la tercera resonancia (alrededor de 400 Hz),
2. la cantidad por la cual esta resonancia se encuentra por encima del nivel de la curva de resonancia,
3. la nitidez (qué tan alto es el valor del factor de calidad Q , la “agudeza” del pico) de esta resonancia,
4. a 6. el nivel medio de las bandas de un tercio de octava en el rango de 80-125 Hz, el nivel medio de las bandas de un tercio de octava en el rango de 250-400 Hz, el nivel medio de las bandas de un tercio de octava en el rango de 315-500 Hz,
7. el nivel promedio de bandas de un tercio de octava en el rango 80-1000 Hz y
8. el nivel de sonido de la segunda resonancia (alrededor de 200 Hz).

Se encontraron correlaciones negativas con:

1. la nitidez (Q) de la primera resonancia (alrededor de 100 Hz),
2. el nivel medio de tercios de octava en el rango 160-250 Hz,
3. el máximo de los niveles de tercio de octava por encima de 1250 Hz, y
4. la división de la segunda resonancia en dos picos.

Es interesante notar la importancia de la resonancia de tipo (0, 1), alrededor de 400 Hz, para determinar la calidad de la guitarra.

¹³⁰ De trascendencia tal que, tanto el manual de Sloane (Sloane, 1985 - editado originalmente en 1976), como Evans & Evans (1977) lo citan en su bibliografía.

¹³¹ Sin embargo, otro autor (ver Meyer 1983 citado por Rossing 2010) opina que este hecho estaría correlacionado negativamente con la calidad.

¹³² Bernard Richardson hace frecuente referencia a dicho cociente llamándolo *mérito acústico*.

¹³³ Una tapa con espesor bajo asegura una buena respuesta hasta los 300 Hz, sin embargo, un valor excesivamente bajo reduce las frecuencias más altas de la tapa empobreciendo la calidad en los agudos. De allí la necesidad de elegir un entorno de compromiso.

Otro trabajo muy profundo e interesante de Meyer es el citado por Jansson (2002) quien especifica la relación de bandas de frecuencias con la adjetivación del sonido escuchado:

- La presencia de parciales fuertes por debajo de 500 Hz corresponde a un sonido con *ataques indistinguibles*.
- Si solo hay frecuencias por debajo de los 2000 Hz, el sonido es *aburrido y hueco*.
- Si hubiese solo frecuencias por encima de los 4000 Hz, sólo se escucharán sonidos correspondientes al *ataque*.
- Un nivel alto en la banda entre 80 y 1000 Hz brinda un sonido *lleno, completo*, mientras que entre 1000 y 3000 Hz brinda un sonido *claro, brillante e incisivo* (pero si el nivel de sonido es demasiado alto en esta última banda suena *áspero*).

Aunque la mayoría de los arreglos del varetaje (abanico armónico, barras armónicas, etc.) y de los espesores de la tapa de las guitarras clásicas son simétricos alrededor de su eje, varios luthiers han experimentado introduciendo diversos grados de asimetría en sus diseños. La mayoría de ellos usan varetas más cortas y/o más gruesas en el lado de los agudos, barras armónicas dispuestas en forma diagonal, etc., lo que hace que la placa sea más rígida en dicha zona. Uno de los diseños más asimétricos fue propuesto por el Dr. Michael Kasha¹³⁴ en 1974 (Evas & Evans 1977) y desarrollado por los luthiers Richard Schneider, G. Eban y otros. En este caso hasta el puente tiene un diseño asimétrico¹³⁵.

Uno de los argumentos a favor de esta opción en el diseño es que potencia la eficiencia de la radiación de sonido de los modos de oscilación de la tapa con número par de antinodos (ver Friederich 1998 y Richardson 1994).

En otras secciones de su libro, Rossing y Fletcher, citan una interesante conclusión (a la cual llegó Schelleng en 1963) según la cual las maderas de resonancia serían aquellas de alto valor del cociente $\frac{c}{\rho}$ (velocidad de ondas longitudinales sobre densidad de masa). También señalan que dicho valor sería proporcional al factor de calidad Q de una pieza de material dada¹³⁶. La obra también habla de dos fenómenos que son relativamente poco nombrados: el que el nivel de humedad en la madera produce una disminución del factor Q (el sonido se vuelve más *apagado* o *sordo*)¹³⁷ y que el tiempo durante el cual se esté ejecutando un instrumento incide en la calidad de sonido del mismo: un hecho que pueden confirmar los músicos y sobre el cual nos comentó el Lic. Ramiro Agriell desafiándonos a buscar sus fundamentos físicos.

Erik Jansson (2002) junto a Roberts desarrollaron investigaciones en cuanto la construcción para lograr una gran calidad de sonido concluyendo que:

- una de las consideraciones más importante a tener en cuenta es un puente bien diseñado el cual actuará como una barra rígida en los modos bajos, pero deberá tener la capacidad de curvarse y tornearse para los modos superiores
- lo siguiente será un mínimo espesor en la tapa (verificándose un cambio radical en la respuesta cuando se pasa de 3.1 mm a 2.1 mm)

¹³⁴ Michael Kasha (1920 - 2013), físico químico estadounidense, uno de los fundadores originales del Instituto de Biofísica Molecular de la Universidad Estatal de Florida.

¹³⁵ Inclusive experimentó con un puente en dos piezas: una para las primas y otra para las bordonas.

¹³⁶ Aunque a priori parecería deseable trabajar con piezas que presenten una amortiguación mínima (alto Q) esto no es cierto. Por ejemplo, muchas especies de madera son rechazadas por los fabricantes porque imparten una calidad demasiado brillante e incluso áspera en el tono.

¹³⁷ El luthier francés Daniel Friederich en su GAM 92 (Friederich 1977) ya indicaba cómo investigar este aspecto tan importante.

□ y por último el espesor mínimo en el contorno de la tapa.

Otro investigador que se ha dedicado al estudio profundo de la guitarra es Bernard Richardson quien en un trabajo relativamente reciente (Richardson 2010) analiza el sonido de una guitarra modelando la tapa como una placa circular plana con el borde fijo a los desplazamientos y que no pueda flexarse en dicho borde. En ese sentido indica que la frecuencia fundamental está dada por la ecuación:

$$f_{01} = 0.467 \left(\frac{h}{a^2} \right) \sqrt{\frac{\gamma}{\rho(1-\nu^2)}}$$

(el término entre paréntesis del denominador de la raíz puede considerarse de valor 1)

Nos muestra que la frecuencia de la tapa puede variarse (*afinarse*) modificando el espesor h o bien el área a (lo cual tendría una influencia mayor). Pero además de esta ecuación deberá tenerse en cuenta el *mérito acústico* (ya nombrado) el cual deberá maximizarse. Como dicho parámetro es proporcional al cociente $\frac{1}{\rho h}$, el constructor deberá elegir los valores del módulo de Young, la densidad, el espesor y el área de tapa que *simultáneamente* definan la afinación de la tapa y maximicen el cociente citado.

Una de las más antiguas y mejor documentadas colaboraciones entre físicos, ingenieros y luthiers es la que comenzó en 1962 cuando el luthier francés Daniel Friederich conoce al profesor Émile Leipp, fundador y Director del Laboratorio de Acústica Musical (LAM) de la Universidad de Jussieu-París VI, quien lo invita a los cursos de física y a integrar el GAM, Grupo de Acústica Musical. De allí en adelante se publican boletines periódicos (entre 1963 y 1987) que profundizan las investigaciones siendo tal vez el más famoso, para el tema que nos ocupa, el *GAM 92 La guitare classique* (Friederich & Leipp, 1977).

Ese documento, junto a Friederich (1998) y una entrevista al mismo (Orfeo magazine N°2 Edición española, 2013), nos brindan una perspectiva muy sólida de su visión como constructor. El mismo se guía por un conjunto de *14 Criterios* para evaluar cada una de sus creaciones:

01. La potencia (de lejos, de cerca), el alcance
02. La duración del sonido (*sustain*)
03. La igualdad del nivel sonoro y del timbre
04. El timbre (la calidad, el tono de voz, su color)
05. El equilibrio entre los graves y los agudos
06. La pulsación ligera o firme del instrumento
07. La homogeneidad de los sonidos
08. La espontaneidad de la respuesta y su sensibilidad
09. El ataque del sonido (audible o discreto)
10. El contraste (tipo clavecín o piano) y la dinámica
11. Las resonancias simpáticas, fuertes o débiles
12. La claridad u opacidad de los sonidos, la definición de los mismos
13. La presencia de ceceos
14. La afinación

En su trabajo de 1977 se centra en el desarrollo de apenas los dos primeros; en el mismo afirma “*El mayor desafío es amplificar todas las frecuencias emitidas por las cuerdas, sin enfatizar o restringir algunas de ellas, específicamente sin super resonancias o agujeros en la respuesta de frecuencia de los instrumentos, que debe sea uniforme para todas las notas ... Todos los luthiers son capaces de construir instrumentos con una generosa respuesta de graves ...la dificultad radica en construir una guitarra con una respuesta de graves, medios y agudos de igual calidad ... esto nos deja con dos opciones extremas:*

1) Hacer una guitarra ligera, como máximo 1600 gramos con una tapa delgada, como la piel de un tambor. Tendremos amplitudes fuertes pero extinciones rápidas de sonido, especialmente porque el fondo y los lados serán muy finos.

Esto dará graves fuertes, un sonido redondo y apagado en general y un sonido corto cuyos ataques se escucharán mucho.

2) Hacer un instrumento más pesado, con espesores mayores, con una tapa más fuertemente barrada que resiste, que "responde", que no está bloqueada. Con un mango bien diseñado, el instrumento en su conjunto estará equilibrado permitiendo un buen potencial de oscilación. Esto da como resultado un sustain prolongado, una potencia máxima y una salida excelente.

Para investigar la importancia de las diversas partes del instrumento deberán atenderse en orden descendente:

- A. la tapa: maderas, varetaje, espesores
- B. el brazo: madera, espesor
- C. los aros y el fondo
- D. el puente
- E. pegamentos y acabados

A continuación, en el documento GAM 92 se detallan aspectos que deben ser tenidos en cuenta al seleccionar la madera y las propiedades de elasticidad, inercia, amortiguación, etc., del brazo, un elemento cuyo rol en la sonoridad del instrumento es el gran olvidado en las investigaciones, quien actuaría además como un filtro.

También se da gran importancia al abombamiento y barrado del fondo el cual influye significativamente en el conjunto.

El diseño del puente se incluye junto a su desarrollo histórico.

Por último, se describen detalladamente un conjunto de experimentos en luthería que cualquier artesano debería consultar en forma obligatoria.

Referencias

Acosta, G., Coirolo, N., Casais, F., & Sierra, F. (2020). *Material Teórico-Práctico Para El Curso De Física* [Ebook] (2nd ed. inglés).

<https://drive.google.com/file/d/1cuwadmy3tuyYq-sgeJj6HjxEvdMdU8ng/view>.

Aharonián, C. (2002). *Introducción a la música*. Ediciones Tacuabé.

Álvarez, A. (2006). *Acústica Musical: fundamentos físicos de los instrumentos musicales*.

Lpi.tel.uva.es.

http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_05_06/io2/public_html/index.html.

APFU (2015) *Documento de trabajo # 4*, Educación en Física, 8(5), APFU.

APFU-a (2020) *Luces, cámara, ... la Física en acción* [Video]. https://youtu.be/Zfvt_Ttl88U.

APFU-b (2020) *El origen (matemático) de la música* [Video]. <https://youtu.be/db3Zoj-bttg>.

Baccino D. (2011). *Espacio Interdisciplinario: Sonido y Acústica Musical*. Laboratorio de Física del IPA. <http://www.anep.edu.uy/ipa-fisica/htm/sec/primer/2008/espacio/espacio.htm>.

Baccino, D. (2012). *Física en Arte y Expresión*. Sites.google.com.

<https://sites.google.com/site/fisicaenarteyexpresion/home>.

Barnech, A., De Souza, A., Trinidad, G. (2002) *Resonancia en sistemas mecánicos*, Educación en Física 6(6), APFU.

Benítez, F., Cardozo, D., Echegorri, F, González, A., Trinidad, G. (2016) *Informe del Curso "Instrumentos musicales-Teoría física y construcción"*, Ameijeda-Núñez, CFE.

Blatt, F., (1991) *Fundamentos de Física 3ra. ed.* Ed. Prentice Hall, México.

Boersma, P., & Weenink, D. (2021). *Praat: doing Phonetics by Computer* [Software].

<https://www.fon.hum.uva.nl/praat/>

Bogdanovich, J., (2007), *Classical Guitar Making. A modern approach to traditional design.*, Ed. Sterling, New York, USA.

Brown, D., Christian, W., y Hanson, R. (2022). *Tracker* (Versión 6) [Software].

<https://physlets.org/tracker/>

- BSE (1987) *Almanaque del Banco de Seguros del Estado*
<https://institucional.bse.com.uy/inicio/almanaques/almanaque-1987>
- Capra, F. (2008) *La ciencia de Leonardo*. Ed. Anagrama, Barcelona, España.
- Carvalho, A. (1998). *Ciências no ensino fundamental* (p. 20). São Paulo: Scipione.
- Chaigne, A., & Kergomard, J. (2016). *Acoustics of musical instruments*. Springer-Verlag.
- Chladni, E. (2022, septiembre). En Wikipedia.
https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Ernst_Chladni&oldid=1109945564
- Courtnall, R., (1976), *Making Master Guitars*, Ed. Robert Hale, London, England.
- Crawford, F. (1971). *Ondas. (Berkeley Physics Course, 3)*. Reverté.
- Cumpiano, W. and Natelson, J., (1993), *Guitarmaking: tradition and technology. A Complete Reference for the Design & Construction of the Steel-String Folk Guitar & the Classical Guitar.*, Ed. Chronicle Books, San Francisco, USA.
- Cumpiano, *Notes on Torres' cardboard guitar*. <https://www.cumpiano.com/torres-cardboard-guitar>
- Daedalon (1993) *Instruction Manual for Air Track, EA-40 Precision Sine Drive*, Daedalon Corp., Salem, Massachusetts, USA.
- Echegorri, F. (2019). *Velocidad del sonido y pérdidas de energía en tubos cilíndricos*. Avances en la enseñanza de la Física, 1(2). <https://doi.org/10.36411/aef.1.2.10>
- Escande, A. (2005) *Abel Carlevaro. Un nuevo mundo en la guitarra*. Ed. Santillana. Fundación Banco de Boston Uruguay. Montevideo, Uruguay.
- Evans, T., Evans M.A., (1977), *Guitars. Music, History, Construction and Players, From the Renaissance to Rock.*, Paddington Press Ltd, NY & London.
- Feynman, R. (1963) *The Feynman lectures on physics*. <https://www.feynmanlectures.caltech.edu/>
- Fletcher, N., & Rossing, T. (2010). *The physics of musical instruments* (2nd ed.). Springer.
- Franco García, A. (2016). *Modos normales de vibración de una barra elástica*. Curso Interactivo de Física en Internet. <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/ondas/viga/viga.html>
- Franco García, A. (2016b). *Oscilaciones amortiguadas*. Curso Interactivo de Física en Internet. <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/oscilaciones/amortiguadas/amortiguadas.html>
- French, A. (1991). *Vibraciones y ondas (Curso de Física del M.I.T.)*. Reverté.

- French, R. M. (2008, 16 diciembre). *Engineering the Guitar: Theory and Practice (English Edition)* (2009.^a ed.). Springer.
- Friederich, D., Leipp, E., (1977) *La Guitare I. Historique. Fonctionnement.*, Bulletin GAM (Groupe d'Acoustique Musicale, Université Paris VI) N°92,
http://www.lam.jussieu.fr/Publications/BulletinsGAM/GAM_92-La%20Guitare_Friederich.pdf
- Friederich, D., (1998) (actualizado en 2013) *LA TAPA DE LA GUITARRA CLÁSICA Y SUS VARETADOS: El dilema del luthier - Simetría o asimetría en el diseño estructural de las tapas.*, Suplemento de la Revista Orfeo Magazine N°2 - Edición española - Otoño 2013.
https://issuu.com/orfeomagazine/docs/orfeo_2_es
- Friederich, D. *Las guitarras modernistas de Francisco y Miguel Simplicio.* (2013, mayo). *Orfeo Magazine*, 1, 16-17. https://issuu.com/orfeomagazine/docs/orfeo_1_es_f708686b83c34c
- Galilei, V., *Vincenzo Galilei*, Wikipedia.
https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Vincenzo_Galilei&oldid=141302907
- Gerard, A. (2011). *El sonograma: una representación práctica de los sonidos.* Revista Boliviana de Física [online], 18, 37–49.
http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1562-38232011000200005&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Haniotis, S., Núñez, I. (2004) *La física de la música*, Educación en Física 8(6), APFU.
- Hecht, E. (2001). *Física 1*. Thomson.
- Hofmeister, T. Jr., (1954) *Torres, the creator of the modern guitar*, *Guitar Review* N° 16, USA.
- Hutchins, C (1962), *The Physics of Violins*, Scientific American 207(5).
- Hutchins, C (1981), *Acústica de las tablas del violín*, Investigación y Ciencia N° 63, Edición en español de Scientific American.
- Jansson (2002), Acoustics for violin and guitar makers. <https://www.speech.kth.se/music/acviguit4/>
- Kinsler, L., Frey, A., Coppens, A., & Sanders, J. (1995). *Fundamentos de acústica*. Limusa.
- Leipp, E.(1959), *L'emploi du sonographe dans la détermination de la qualité des instruments a cordes*, Cahiers d'acoustique N°98 (Groupement des acousticiens de langue française). Annales des télécommunications.

- Leybold LD DIDACTIC (2011) *Péndulo de torsión de Pohl P1.3.5.1*, Catálogo General de Experimentos de Física. https://www.ld-didactic.de/pdf/ld_versuche2011_es.pdf
- Logger Pro (Versión 3). (2022). [Software]. Vernier. <https://www.vernier.com/product/logger-pro-3/>
- López, F., Navarro, R. (2019) "*La Española. La de Torres*", Documental. Dos lúmenes Producciones, España.
- Louzao, R., (2009), *La guitarra mágica: manual argentino de la guitarra*, Bs. As., Argentina.
- Luzuriaga, J., & Pérez, R. (2006). *La física de los instrumentos musicales* (1st ed.). Eudeba.
- Martínez Sirvent, Rvdo. J. (1931), *El Maestro Torres, carta abierta*, <https://youtu.be/zRoSHznV3YQ> .
- Massmann, H., & Ferrer, R. (1993). *Instrumentos musicales, artesanía y ciencia*. Dolmen Editores.
- Mazzoni, D., & Dannenberg, R. (1999). Audacity (Versión 3) [Software].
<https://www.audacityteam.org/>
- Miyara, F. (2006). *Acústica y sistemas de sonido*. Universidad Nacional de Rosario.
- Monteiro, M., Stari, C., Cabeza, C., & Martí, A. (2018). *A bottle of tea as a universal Helmholtz resonator*. The Physics Teacher, 56(9), 644-645. <https://doi.org/10.1119/1.5080589>
- Monteiro, M. (2020). *Martín Monteiro @fisicamartin*. Fisicamartin.blogspot.com.
<http://fisicamartin.blogspot.com/>
- Mosquitono Wikipedia, <https://es.wikipedia.org/wiki/Mosquitono>
- Muñoz, R. (2015) *Tecnología de la guitarra argentina* Instituto Lucchelli Bonadeo, Bs. As., Argentina (Edición original de 1952).
- Murray, C., Whitfield, S. *Inharmonicity in plucked guitar strings* American Journal of Physics 90, 487 (2022).
- Nuestra Tierra (1970), *Los Departamentos: Canelones 16*.
- Núñez, I. (2015, Noviembre). *Instrumentos musicales Introducción a la acústica de la guitarra*. Departamento Nacional de Física (CFE). Notas para el curso "Instrumentos musicales - Teoría física y construcción"
- Núñez, I. (2019). *Almacenamiento de sonido: el disco de vinilo vs. el formato digital*. Educación en Física, (38), 3-16, APFU.
- Núñez, I. (2022). *Espectrograma de audio* [Software].

Orfeo magazine N° 2 Edición española (2013), Revista dedicada a la guitarra clásica, a los luthiers y a su entorno cultural, https://issuu.com/orfeomagazine/docs/orfeo_2_es

Orfeo magazine N° 9 Edición española (2017), Revista dedicada a la guitarra clásica, a los luthiers y a su entorno cultural, https://issuu.com/orfeomagazine/docs/orfeo_9_es

Orfeo magazine N° 13 Edición española (2019), Revista dedicada a la guitarra clásica, a los luthiers y a su entorno cultural, https://issuu.com/orfeomagazine/docs/orfeo_13_es

Parrella, A. (2020). Para la clase de Física <https://aparrella.wordpress.com/>.

Park, H. (2002). Time Course of the First Formant Bandwidth. Annual Meeting of the Berkeley Linguistics Society, 28(1), 213. <https://doi.org/10.3765/bls.v28i1.3836>

Pellisa, J. (2017), Conferencia “Vida y obra de Antonio de Torres. Entre la constancia y la diversidad”, *Jornadas Internacionales de la Guitarra*. https://youtu.be/UKxujRv_aps

Pellisa, J. (2017-2),
<https://www.ccma.cat/catradio/alcanta/taller-lutier/bicentenari-torres-4-la-guitarra-de-cartro/audio/958570/>

Pellisa, J. (2017-3)
<https://fuera de imprenta.wordpress.com/2017/11/03/joan-pellisa-torres-llega-a-un-conocimiento-tal-de-como-funciona-la-guitarra-que-lo-aplica-al-maximo/>

Polino, C (2012). *Las ciencias en el aula y el interés por las carreras científico- tecnológicas: un análisis de las expectativas de los alumnos de nivel secundario en Iberoamérica*. Revista Iberoamericana de Educación, OEI, N°58, pp. 167-191 (ISSN: 1022-6508). Madrid/ Buenos Aires.

Pozzi, R.& Migliorini, M., (2001), *Tesi La Chitarra Papier Mache'*, Cívica Scuola di Liuteria di Milano, Italia.

Prat, D. (1934) *Diccionario de guitarristas*, Ed. Romero y Fernández, Bs. As., Argentina.

Ramírez III, J., (1990), *En torno a la guitarra*, SONETO ediciones musicales, Madrid, España.

Ray, J. (2013, 17 noviembre). *A look inside Torres' paper mache guitar*. Great Guitars of the Past.
<https://johnnguitar.com/a-look-inside-torres-paper-mache-guitar/>

Reporter Revista (1961), Gilbert, I., *Otra cosa es con guitarra*, Vol. II, N° 16, 28 de junio de 1961, Montevideo, Uruguay:
<https://anaforas.fic.edu.uy/jspui/handle/123456789/11925>

Resnick, R., Halliday, D. (1980) *Física parte 1*, CECSA, México.

Resonancia. (2022, 6 mayo). *En Wikipedia, la enciclopedia libre*.

https://es.wikipedia.org/wiki/Resonancia#Resonancia_de_un_oscilador_amortiguado_e_impulsado

Richardson, B. (1994) *The acoustical development of the guitar*, Journal of the Catgut Acoustical Society, Vol. 2 N° 5 (Series II).

Richardson, B. (2010) *Guitar making-The acoustician's tale*:

https://viennatalk.mdw.ac.at/papers/Pap_01_64_Richardson.pdf

Rocard report, "Science education now: A Renewed Pedagogy for the future of Europe ", (2007):

https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=https://ec.europa.eu/research/science-society/document_library/pdf_06/report-rocard-on-science-education_en.pdf&ved=2ahUKEwi-3ZLqrJLtaAhXwErkGHWaNCdGQFjAAegQICxAC&usg=AOvVaw3Be6INWU-q0yow2WdXVUbs

Roederer, J. (1997). *Acústica y psicoacústica de la música*. Ricordi.

Romanillos, J., (2020), *Antonio De Torres: Guitarrero, su vida y obra*, Instituto de Estudios Almerienses, Colección Historia nro. 15, Almería, España.

Rossing, T. & Fletcher, N. (2010) *The Physics of Musical Instruments*, 2nd. ed., Springer, USA.

Rossing, T., & Russell, D. (1992), *On the acoustics of tuning forks*.

https://www.researchgate.net/publication/259017541_On_the_acoustics_of_tuning_forks

Russell, D. (2020). *Dan Russell's Acoustics and Vibration Animations*. Acs.psu.edu.

<https://www.acs.psu.edu/drussell/demos.html>.

Russell, D. (2013). *Vibrational Modes of a Tuning Fork*.

<https://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/TuningFork/fork-modes.html>

Serway, R., Vuille, C., Faughn, J.,(2010) *Fundamentos de física*, 8va ed., CENGAGE Learning, México.

Sloane, I., (1985), *Classic guitar construction*, Omnibus Press, London, England.

Soundie - Reg Kehoe and his Marimba Queens. (1940). Internet Archive.

<https://archive.org/details/SoundieF>

- Suárez, A., Vachetta, M. (2015) *Análisis de sistemas oscilatorios sometidos a distintas fuerzas disipativas*, Educación en Física 8(5), APFU.
- Trinidad, G. (2009) *Termodinámica: determinación del coeficiente γ (gamma) del aire por el método de Rűchhardt*, Educación en Física 7(7), APFU.
- Trinidad, G. (2018). *Física con XO*. Ministerio de Relaciones Exteriores. Administración de Educación Pública. Consejo de Educación Técnico Profesional.
- Villar Rodríguez, J., (1985), *La Guitarra Española. Características y construcción.*, Ed. CLIVIS Publicacions, Barcelona, España.
- Wilberforce, L. (1894) *On the vibrations of a Loaded Spiral Spring*, The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science 38(230), Taylor and Francis, London.
https://books.google.com/books/about/The_London_Edinburgh_and_Dublin_Philosop.html?hl=es&id=TVQwAAAAIAAJ#v=onepage&q&f=false
- Winn, A. J. (2019, 01 febrero). *Hofmeister plan of Torres FE26 guitar*. Joss Winn.
<https://josswinn.org/2019/02/01/hofmeister-plan-of-torres-fe-26-guitar/>
- Yakman, G., (2008) *STEAM education: an overview of creating a model of integrative education*.
https://www.researchgate.net/publication/327351326_STEAM_Education_an_overview_of_creating_a_model_of_integrative_education