



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**APLICACIÓN DEL FENÓMENO DE RESONANCIA MECÁNICA AL DISEÑO DE
AMPLIFICADORES ACÚSTICOS ADAPTABLES A LAS GUITARRAS CLÁSICAS**

Dennis Rolando Ulín Ramírez

Asesorado por el Ing. Víctor Hugo Dardón Castillo

Guatemala, mayo de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Roberto Guzmán Ortiz
EXAMINADOR	Ing. José Ismael Véliz Padilla
EXAMINADOR	Ing. Hugo Leonel Ramírez Ortíz
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**APLICACIÓN DEL FENÓMENO DE RESONANCIA MECÁNICA AL DISEÑO DE
AMPLIFICADORES ACÚSTICOS ADAPTABLES A LAS GUITARRAS CLÁSICAS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 8 de noviembre de 2017.



Dennis Rolando Ulín Ramírez

Guatemala, 18 de marzo de 2019

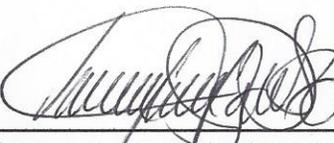
Ingeniero
Julio César Campos Paiz
Director de Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ing. Campos:

Por este medio hago constar mi aprobación del trabajo de graduación con título **“APLICACIÓN DEL FENÓMENO DE RESONANCIA MECÁNICA AL DISEÑO DE AMPLIFICADORES ACÚSTICOS ADAPTABLES A LAS GUITARRAS CLÁSICAS”**, elaborado por el estudiante de la carrera de Ingeniería Mecánica, Dennis Rolando Ulín Ramírez, quien se identifica con número de registro académico 201314772 y CUI 3484390830101.

Agradeciendo la atención prestada a la presente.

Me suscribo de usted,

(f) 
Víctor Hugo Dardón Castillo
Ingeniero Mecánico
Colegiado 13053

Víctor Hugo Dardón Castillo
Ingeniero Mecánico
Colegiado 13,053



USAC

TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.075.2019

El Coordinador del Área de Diseño de Ingeniería de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado: **APLICACIÓN DEL FENÓMENO DE RESONANCIA MECÁNICA AL DISEÑO DE AMPLIFICADORES ACÚSTICOS ADAPTABLES A LAS GUITARRAS CLÁSICAS** desarrollado por el estudiante **Dennis Rolando Ulín Ramírez**, CUI **3484390830101** y Reg. Académico No. **201314772** recomienda su aprobación.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Julio César Campos Paiz
Coordinador Área de Diseño
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, marzo 2019



USAC

TRICENTENARIA

Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.111.2019

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y con la aprobación del Coordinador del Área de Diseño del trabajo de graduación titulado: **APLICACIÓN DEL FENÓMENO DE RESONANCIA MECÁNICA AL DISEÑO DE AMPLIFICADORES ACÚSTICOS ADAPTABLES A LAS GUITARRAS CLÁSICAS** desarrollado por el estudiante **Dennis Rolando Ulín Ramírez**, CUI **3484390830101** y Reg. Académico No. **201314772** y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Julio César Campos Paiz
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica

Guatemala, mayo de 2019

/aej

Universidad de San Carlos
de Guatemala

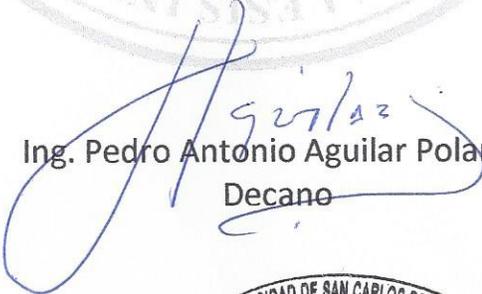


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 213.2019

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **APLICACIÓN DEL FENÓMENO DE RESONANCIA MECÁNICA AL DISEÑO DE AMPLIFICADORES ACÚSTICOS ADAPTABLES A LAS GUITARRAS CLÁSICAS**, presentado por el estudiante universitario: **Dennis Rolando Ulín Ramírez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, mayo de 2019

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Incomparable ha sido tu bondad y tu fidelidad, tu amor inagotable, tu paciencia, tu perdón, tu fortaleza, tu provisión, grande es tu palabra con la cual vivificas mi ser y me permites ver que te debo todo esto a ti.
- Mis padres** Rolando Ulín y Ester Ramírez por amarme y ayudarme tanto para que hoy esté aquí; por enseñarme y cuidarme, por proveer lo mejor para nuestro hogar.
- Mi hermana** Ligia Ulín, por su gran compañerismo y amistad en Cristo, gracias por permitirme conocer al Señor con tu vida.
- Mi familia** Por permitirnos contar con su amor en todo momento, por apoyarnos en muchas situaciones y animarnos a salir adelante.
- Los navegantes** Por tanto amor, compañerismo, correcciones, instrucciones, ánimos, fortaleza, alegrías y por su gran provisión, gracias por apoyarnos tanto en el ministerio de la Universidad.

Mi asesor

Ing. Víctor Dardón, muchas gracias por compartir sus conocimientos y su experiencia amplia en la investigación conmigo, por animarme y enseñarme a lo largo de este trabajo a aplicar mi carrera. Gracias por brindar de su amistad y permitirme conocer su trabajo profesional.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Gracias a Dios que tenemos una oportunidad de recibir educación profesional a bajo costo, es una bendición formar parte de los profesionales de Guatemala que formaron sus bases académicas en este lugar.

Facultad de Ingeniería

Por formarnos y permitirnos aprender desde los primeros cursos las bases que aplicaremos en el ámbito profesional.

**Mis amigos de la
Facultad**

Por la dicha de compartir esos momentos juntos, especialmente agradezco a Dios haberme permitido compartir estos años con grandes amigos y hermanos en la fe que llegaron a ser un fuerte apoyo para el crecimiento a la imagen y semejanza de Cristo Jesús, “por ser como ese hierro que aguza, para afilar el hierro, la lima; para ser mejor persona, el amigo.” Luis Tejada, Jorge Gálvez, Jetro Hernández, Miguel Ajzip y fue una dicha enorme disfrutar los últimos años con los amigos del grupito.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN.....	XVII
1. CONCEPTOS BÁSICOS	1
1.1. Breve historia de la guitarra clásica.....	1
1.2. Partes de la guitarra clásica	2
1.3. Ondas sonoras.....	3
1.4. Afinación y gama de frecuencias que produce la guitarra clásica	3
1.5. Tipos de ataque de la cuerda para producir sonido en la guitarra clásica	4
1.6. Espectro sonoro y la amplitud de la guitarra clásica	5
1.7. Patrón de radiación del sonido en la guitarra clásica.....	7
1.8. Intensidad del sonido	8
1.9. Escala de decibeles	8
1.10. Potencia de las ondas sonoras.....	9
1.11. Presión	9
1.12. Reflexión de ondas	9
1.13. Materiales reflectores del sonido.....	9
1.14. Velocidad del sonido.....	10
1.14.1. Velocidad del sonido en materiales sólidos	10

1.14.2.	Velocidad del sonido en materiales gaseosos	11
1.15.	Propagación del sonido	11
1.16.	Interferencia de ondas	12
1.17.	Interferencia constructiva.....	12
1.18.	Interferencia destructiva	12
2.	RESONANCIA MECÁNICA	13
2.1.	Fenómeno de resonancia mecánica	13
2.2.	Cajas de resonancia	13
2.3.	Resonador de Helmholtz	14
2.4.	Resonador múltiple de Helmholtz.....	15
2.5.	Materiales aptos para la construcción de cajas de resonancia	15
2.6.	Análisis modal de las cajas de resonancia.....	15
2.7.	Método del elemento finito para el análisis modal de las placas vibratorias	16
2.8.	Patrón de vibración en placas vibratorias ante una fuente de excitación	16
3.	ANÁLISIS DE SEÑALES ACÚSTICAS	19
3.1.	Análisis de Fourier para descomposición de señales acústicas complejas.....	19
3.2.	Espectro de amplitud	20
3.3.	Espectro de frecuencias	20
3.4.	Espectro de fase	21
3.5.	Medición de la potencia sonora de una fuente de sonido	21
3.6.	Software para analizar las señales acústicas.....	21
3.7.	Espectro sonoro del ruido rosa.....	21

4.	DISEÑO EXPERIMENTAL	25
4.1.	Reflexión de ondas de agua dirigidas hacia un punto focal	25
4.2.	Análisis de eficiencias energéticas de las cajas de resonancia usando como base el modelo de la prensa de pascal.....	28
4.3.	Uso del ruido rosa para simular el espectro de los amplificadores acústicos.....	32
4.4.	Forma de transmisión de la vibración mecánica de la guitarra clásica al resonador de Helmholtz	35
5.	RESULTADOS.....	37
6.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	53
	CONCLUSIONES	57
	RECOMENDACIONES.....	59
	BIBLIOGRAFÍA.....	61

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Identificación de las partes de la guitarra clásica	3
2.	Frecuencias que pueden ser pulsadas en la guitarra clásica	4
3.	Espectro de Helmholtz de la guitarra clásica Yamaha C 40	6
4.	Espectro de la estructura de la guitarra clásica Yamaha C 40	6
5.	Cálculo de frecuencia de resonancia de una caja sin cuello	14
6.	Simulación del patrón de vibración de una placa vibratoria	17
7.	Descomposición de la frecuencia de 329 Hz en dos cuerdas distintas de una guitarra clásica	19
8.	Descomposición del espectro de una caja de resonancia circular al ser golpeada manualmente	20
9.	Ruido blanco, rosa y rojo visto en un analizador tipo RTA	22
10.	Ruido blanco, rosa y rojo visto en un analizador tipo FFT	23
11.	Frente de onda atravesando el resonador usando agua como medio para transportar energía	25
12.	Gráfica de fuerza contra elongación del sistema de resortes	29
13.	Sistema masa resorte acoplado a la cámara hermética	30
14.	Sensor de presión diferencial MPXV7002DP	30
15.	Tarjeta Arduino uno	31
16.	Visualización de la presión diferencial con el software de Arduino.....	31
17.	Código de programación cargado a la tarjeta Arduino uno.....	32
18.	Medición del espectro de frecuencias generado por la bocina	34
19.	Medición del espectro de frecuencias generado por la cámara hermética	34

20.	Acople del costado de la guitarra con el resonador mediante imanes de neodimio.....	35
21.	Ruido rosa y espectro de frecuencias del aire interno de la cámara hermética del modelo 1	38
22.	Espectro de frecuencias real del aire interno del modelo 1	39
23.	Ruido rosa y espectro de frecuencias del aire interno de la cámara hermética del modelo 2	40
24.	Espectro de frecuencias real del aire interno del modelo 2	41
25.	Ruido rosa y espectro de frecuencias del aire interno de la cámara hermética del modelo 3	42
26.	Espectro de frecuencias real del aire interno del modelo 3	42
27.	Ruido rosa y espectro de frecuencias del aire interno de la cámara hermética del modelo 3 empleando material reflector en el interior	44

TABLAS

I.	Primera iteración de los perfiles de los resonadores	26
II.	Segunda iteración de perfiles aplicando contornos parabólicos.....	27
III.	Tercera iteración de los perfiles de los resonadores	27
IV.	Cámaras herméticas de los resonadores de Helmholtz propuestos	28
V.	Condiciones aplicadas para obtener los espectros de frecuencias de las cámaras herméticas.....	33
VI.	Eficiencias de energía aprovechada para cada modelo de resonador propuesto.....	37
VII.	Espectros de frecuencias para el primer prototipo.....	38
VIII.	Espectros de frecuencias para el segundo prototipo	39
IX.	Espectros de frecuencias para el tercer prototipo.....	41
X.	Espectros de frecuencias para el tercer prototipo empleando <i>plywood</i> en el interior de la cámara hermética de simulación.....	43

XI.	Espectros de amplificación en la primera guitarra	45
XII.	Espectros de amplificación en la segunda guitarra.....	46
XIII.	Espectros de amplificación en la tercera guitarra	47
XIV.	Espectros de amplificación en la cuarta guitarra.....	48
XV.	Espectros de amplificación en la quinta guitarra.....	49
XVI.	Frecuencias de las estructuras en estudio	50
XVII.	Intervalo de frecuencias que son amplificadas en el rango de octava en estudio.....	51
XVIII.	Intervalo de frecuencias que no son amplificadas en el rango de octava en estudio.....	51
XIX.	Guitarras que fueron amplificadas en el rango de 73,4 Hz a 146,8 Hz.....	52

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
γ	Razón de capacidades caloríficas
cm	Centímetro
dB	Intensidad del sonido en decibeles
E	Módulo de elasticidad
Hz	Hercio
I	Intensidad del sonido en vatios por metro cuadrado
I₀	Intensidad de referencia
μ	Densidad lineal
M	Masa molar del gas
ρ	Densidad
Pa	Pascal
R	Constante de los gases
T	Tensión del elemento transmisor
v	Velocidad del sonido

GLOSARIO

ADC	Convertidor análogo a digital.
Conducción	Forma de transmisión de la energía por contacto directo.
Convección	Forma de transmisión de la energía usando un líquido o un gas como medio de transporte.
Decibel	Escala logarítmica de la intensidad del sonido.
FFT	Transformada rápida de Fourier para descomponer una señal compleja en sus armónicos.
Hercio	Número de ciclos por segundo a los cuales vibra un cuerpo.
Nivel de confianza	Probabilidad de rechazar la hipótesis nula cuando esta es verdadera.
Poliestireno expandido	Plástico celular de baja densidad
Resonancia	Estado inducido de máxima vibración
RMS	Valor eficaz.

<i>Tabs</i>	Temperatura absoluta.
W (-)	Suma de rangos negativo.
W (+)	Suma de rangos positivo.
W crítico	Valor crítico para la prueba de signos de Wilcoxon.

RESUMEN

El siguiente estudio consta del análisis de los conceptos básicos que rigen el funcionamiento de las cajas de resonancia y de síntesis aplicada a tres prototipos de resonadores para obtener una simulación de los espectros de frecuencias y de sus eficiencias energéticas. Se mantiene el mismo micrófono, ADC y las mismas condiciones para la toma de muestras de sonido para obtener datos verídicos.

Se adaptó un resonador prototipo a una muestra de guitarras clásicas para estimar las diferencias de decibeles al comparar el espectro sin adaptar el prototipo contra el espectro obtenido al adaptar el resonador al cuerpo de la guitarra clásica estudiada.

Se aplicó estadística no paramétrica para encontrar una diferencia significativa en el aumento de decibeles para el rango de frecuencias desde 73,4 Hz hasta 146,8 Hz y para hallar una diferencia significativa en el aumento de decibeles en ese intervalo debido a que la frecuencia de resonancia de Helmholtz y la frecuencia de la estructura del prototipo, así como la frecuencia del aire interno de las guitarras clásicas, se encuentran en ese intervalo.

OBJETIVOS

General

Elaborar un prototipo de un amplificador acústico adaptable a una guitarra clásica aplicando el fenómeno de resonancia mecánica.

Específicos

1. Describir las necesidades acústicas que una guitarra clásica debe proporcionar.
2. Analizar los parámetros acústicos y mecánicos que respalden el diseño y elaboración de cajas de resonancia.
3. Identificar las frecuencias que emiten las guitarras clásicas con menor contenido armónico.
4. Elaborar un resonador de Helmholtz capaz de adaptarse a la guitarra clásica.
5. Realizar un análisis estadístico comparativo para determinar una diferencia significativa de la potencia sonora y del contenido armónico al adaptar un amplificador acústico a una muestra de guitarras clásicas.

INTRODUCCIÓN

La física que se aplica al diseño y construcción de los instrumentos musicales de cuerda es tema de interés para varias áreas de la ingeniería, es una fuente para la innovación basada en productos existentes. Se presenta una forma particular de aplicar la ingeniería para analizar las cajas de resonancia antes y después de su fabricación.

El aire interno de una caja de resonancia tiene una frecuencia de pico, según sean las dimensiones geométricas del resonador. Además la estructura tiene una frecuencia de resonancia; este segundo tema es de alto interés para la ingeniería mecánica.

Debido a la necesidad de fortalecer las bases para el diseño de estructuras acústicas se realizan cámaras herméticas para simular el producto previo a su construcción aplicando conceptos de presión, reflexión de ondas, descomposición de señales acústicas en sus frecuencias armónicas y el fenómeno de resonancia mecánica para obtener una ganancia de decibeles en el instrumento musical al cual se pretende adaptar el producto final.

1. CONCEPTOS BÁSICOS

1.1. Breve historia de la guitarra clásica

El origen de la guitarra es incierto, debido a que muchos años atrás antes de Cristo en los pueblos de medio oriente construyeron instrumentos musicales como la *kithara*, el *tonbur* y el laúd con características en común y quizá hayan sido la base de los instrumentos desarrollados posteriormente. En la época medieval surge la guitarra morisca y la guitarra latina.

A principios del siglo XVII surge un nuevo modelo de guitarra española denominada guitarra barroca, la cual llamó la atención de los músicos por sus posibilidades artísticas. En el siglo XVII la guitarra barroca sufre ciertas modificaciones que conducen hacia el diseño que ahora se conoce, como el de que se añade la sexta cuerda de orden grave y al poco tiempo después se sustituyen las cuerdas dobles por una sola cuerda simple.

Las cuerdas entorchadas y el clavijero mecánico son ahora parte en sustitución de la pieza con tornillos de madera para tensar las cuerdas; también se implementó el diapason con trastes fijos de metal. Un cambio muy importante fue el aumento de la caja de resonancia pero estrechando la cintura de la misma.

Antonio de Torres un luter español, realizó modificaciones a la guitarra que contribuyeron en gran manera al diseño que se ve actualmente, debido a que incluyó un conjunto de varas en forma de abanico en la tapa armónica.

Actualmente, la guitarra es foco de atención para innovar y desarrollar nuevas posibilidades acústicas a gusto del intérprete, la cantidad de luthieres es inmensa. Se han hecho modificaciones al diseño original desde el volumen del cuerpo, hasta el vetaje.

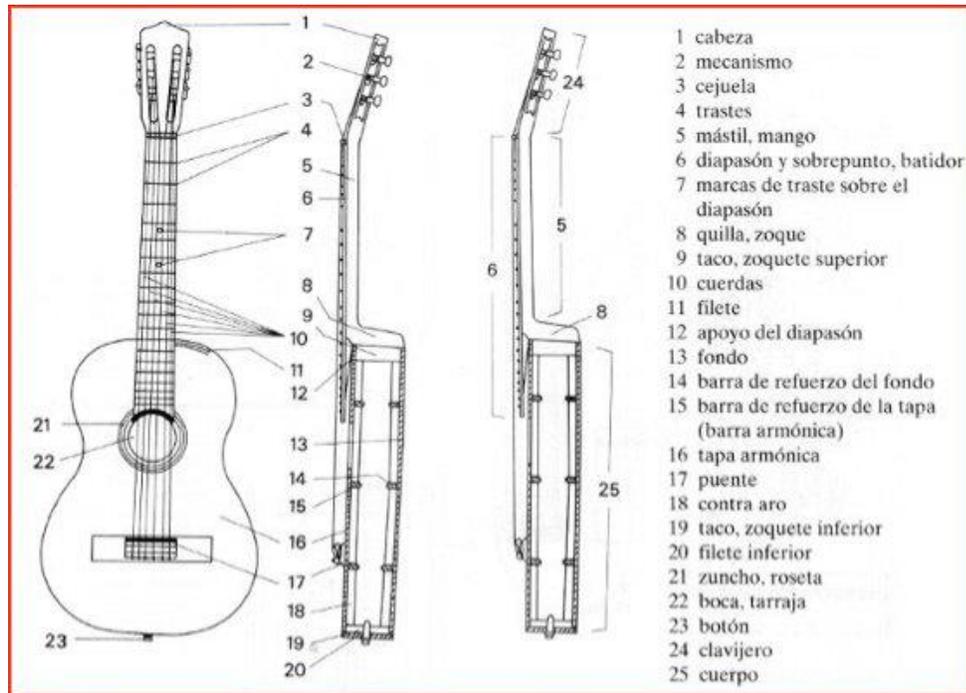
Muchas guitarras clásicas tienen un cuello de madera, otras tienen una ceja más grande. Las guitarras actuales no tienen una sola boca. En el mercado se pueden encontrar guitarras con dos bocas, con doble tapa, y otras.

1.2. Partes de la guitarra clásica

La guitarra clásica consta de un juego de seis cuerdas que se tensan mediante un mecanismo de engranajes pequeños y la caja de resonancia, que es el elemento principal.

Para proporcionar capacidades acústicas tiene un puente que transmite la energía de las cuerdas hacia la tapa armónica. La vibración se transmite a los costados, a la tapa trasera y, por supuesto, al aire interno del cuerpo.

Figura 1. **Identificación de las partes de la guitarra clásica**



Fuente: SANCHIZ, Vicente. *Guitarra*. <http://cemisla.com/etiqueta/guitarra-2/>. Consulta: 4 de febrero de 2018.

1.3. Ondas sonoras

Las ondas sonoras son producidas por un cuerpo que vibra a una frecuencia entre 20 hercios y 20 kilohercios, aproximadamente. El oído humano solo puede escuchar sonidos que vibren a ese intervalo de frecuencias.

1.4. Afinación y gama de frecuencias que produce la guitarra clásica

Las frecuencias que puede pulsar el músico en la mayoría de las guitarras clásicas se aprecian resaltadas en color café en la siguiente imagen.

Figura 2. **Frecuencias que pueden ser pulsadas en la guitarra clásica**

Nota	Hz	Nota	Hz	Nota	Hz	Nota	Hz
C2	65,4	C3	130,8	C4	261,6	C5	523,3
C#2	69,3	C#3	138,6	C#4	277,2	C#5	554,4
D2	73,4	D3	146,8	D4	293,7	D5	587,3
D#2	77,8	D#3	155,6	D#4	311,1	D#5	622,3
E2	82,4	E3	164,8	E4	329,6	E5	659,3
F2	87,3	F3	174,6	F4	349,2	F5	698,5
F#2	92,5	F#3	185	F#4	370	F#5	740
G2	98	G3	196	G4	392	G5	784
G#2	103,8	G#3	207,7	G#4	415,3	G#5	830,6
A2	110	A3	220	A4	440	A5	880
A#2	116,5	A#3	233,1	A#4	466,2	A#5	932,3
B2	123,5	B3	246,9	B4	493,9	B5	987,8

Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2010.

1.5. **Tipos de ataque de la cuerda para producir sonido en la guitarra clásica**

Las técnicas básicas para producir un sonido agradable en la guitarra clásica son el enganchado y el apoyado. El apoyado es una de las técnicas más utilizadas, sin embargo, a pesar de generar una gran intensidad, el tiempo de duración del sonido es menor que con el enganchado, esto debido a que en el apoyado se induce un ligero movimiento vertical en la cuerda y un movimiento horizontal. En el enganchado puede ser posible obtener una componente vertical de movimiento más pequeña y óptima para obtener un tiempo de duración mayor.

Como el enganchado es capaz de proporcionar un ángulo de ataque óptimo, en la práctica se percibe con menor intensidad que con el apoyado y para desarrollar un sonido profesional y óptimo con el enganchado es necesario

desarrollar cierta habilidad motriz, fuerza y aplicar un ligero amortiguamiento con las yemas de los dedos.

1.6. Espectro sonoro y la amplitud de la guitarra clásica

Actualmente, usando un software que descomponga la señal en su espectro de frecuencias, un pequeño sistema de grabación y golpeando el puente de una guitarra se puede generar una gráfica de nivel de presión sonora frente a la frecuencia conocida como espectro de frecuencias y este representa el conjunto de frecuencias que puede producir una caja de resonancia.

El espectro de amplitud representa la intensidad en decibeles frente a las frecuencias armónicas encontradas en la señal grabada. Este análisis presenta el contenido armónico que acompaña a una nota o frecuencia fundamental.

Cabe resaltar que las dimensiones de una guitarra clásica son estándares, por lo que el volumen de aire vibrará comúnmente a una frecuencia entre 90 y 116 Hz y el cuerpo está afinado en varios instrumentos que se consiguen en Guatemala entre 180 Hz y 235 Hz. El músico necesita un instrumento con altas capacidades en todo el espectro mayormente en la zona grave y media.

Figura 3. **Espectro de Helmholtz de la guitarra clásica Yamaha C 40**



Fuente: elaboración propia, empleando el programa Oscillometerxz.

Figura 4. **Espectro de la estructura de la guitarra clásica Yamaha C 40**



Fuente: elaboración propia, empleando el programa Oscillometerxz.

1.7. Patrón de radiación del sonido en la guitarra clásica

La intensidad del sonido de una guitarra clásica se percibe distinto según el punto donde la persona se ubique, si un micrófono está detrás del guitarrista podría pensarse que no se escuchará bien porque no se está grabando el sonido en la boca de la guitarra, como comúnmente se hace. Al escuchar desde direcciones distintas, el oyente podrá comprobar este fenómeno. El fundamento es la superposición de ondas sonoras que, al estar en fase la frecuencia del instrumento con la frecuencia de resonancia del aire de la cavidad de la guitarra, aumentan; cuando están desfasadas, se restan.

Este es el principio que usan los ingenieros de sonido debido a que no siempre puede ser la mejor grabación la que se obtiene a la salida de la boca de la guitarra.

A frecuencias por debajo de 300 Hz la guitarra se comporta como una bocina sustentada principalmente por la frecuencia grave del aire de la cavidad de Helmholtz. A frecuencias por encima de 300 Hz la guitarra se comporta como dos bocinas en paralelo. Al ejecutar notas graves, medias y agudas simultáneamente se tendrá la radiación del sonido de la tapa, de la estructura como conjunto y del aire de la cavidad.

Un ejemplo muy similar se da cuando se deja caer una piedra en un lago, ahí se pueden apreciar ondas circulares en el agua. Si se dejan caer dos, una cerca de otra en el lago, se puede ver cómo hay ciertas crestas de la onda que crecen y otras que decrecen debido a que unas van en la misma dirección y otras van en dirección opuesta, unas están en fase y otras están desfasadas.

Se recalca que la resonancia ocurre cuando hay ondas en fase, si se pretende que un niño en un columpio se divierta más, tiene que empujar coordinadamente el columpio; tiene que empujar en el momento correcto si no el columpio disminuirá su velocidad en lugar de aumentarla.

1.8. Intensidad del sonido

Las ondas sonoras transportan energía y viajan como frentes de onda hacia una superficie, si la superficie es pequeña como un tímpano y la onda lleva gran cantidad de energía a una alta frecuencia será molesto y dañino a largo plazo para el oyente. La potencia se mide en vatios y si esta magnitud se divide entre el área transversal que se opone al frente de la onda, se obtiene un valor que indica la velocidad con que una fuerza impacta un área transversal que se opone al frente de la onda.

1.9. Escala de decibeles

Debido a que el oído es muy sensible se estableció la escala de los decibeles para cuantificar la intensidad sonora que puede ser perceptible al oído humano.

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

Siendo:

β = intensidad del sonido en decibeles

I = intensidad del sonido en vatios/m^2

I_0 = intensidad de referencia = $10^{-12} \text{ vatios}/\text{m}^2$

1.10. Potencia de las ondas sonoras

Al definir que la intensidad es la energía que atraviesa un área por unidad de tiempo esta variable puede incrementarse si una onda tiene una alta frecuencia. Así mismo, al tener una amplitud de onda elevada, si la elasticidad del material es alta, la densidad es baja y hay tensiones en el mismo, entonces la potencia es mayor.

1.11. Presión

Definida como la fuerza por unidad de área indica qué tan intensa es la concentración de tensiones que recibe un área donde se aplica la fuerza.

1.12. Reflexión de ondas

Las ondas convergen y divergen, se reflejan, se absorben, en determinadas aplicaciones se necesita que las ondas se concentren en un punto, tal es el caso de las antenas parabólicas, en las cuales las ondas electromagnéticas se re direccionan en la estructura parabólica hacia el punto focal.

1.13. Materiales reflectores del sonido

Son materiales lisos que permiten que una onda de presión de aire sea re direccionada y no absorbida por la pared de la estructura.

1.14. Velocidad del sonido

El sonido necesita un medio para propagarse, a su vez, este medio debe estar sometido a cierta tensión para transmitir la frecuencia de vibración.

La rapidez del sonido viene dada por la siguiente ecuación:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

Siendo:

v = velocidad del sonido

T = tensión del elemento transmisor

μ = densidad lineal = $\frac{\text{masa}}{\text{longitud}}$

Hay muchas formas de aumentar la velocidad del sonido con fines acústicos, una es aumentando la tensión del material aplicable a pequeños experimentos para cuerdas, otra manera es usando materiales de baja densidad y de alto módulo de elasticidad.

1.14.1. Velocidad del sonido en materiales sólidos

El sonido se propaga más rápido en materiales con alto módulo de elasticidad y en los materiales menos densos. El valor de la rapidez del sonido en sólidos está dado por la siguiente ecuación:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \frac{\text{Módulo de elasticidad}}{\text{Densidad}}$$

1.14.2. Velocidad del sonido en materiales gaseosos

La rapidez del sonido en un gas está en función de la temperatura del gas, de la capacidad calorífica del gas y de sus constantes de masa molar y de la constante R de los gases. Se puede obtener a partir de la siguiente ecuación:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma * R * T_{abs}}{M}}$$

Siendo:

γ = es la razón de capacidades caloríficas.

R = constante de los gases igual a $8.314472 \text{ J/mol} * K$

T_{abs} = temperatura absoluta del gas en grados Kelvin

M = masa molar del gas

1.15. Propagación del sonido

Puesto que no es visible el desplazamiento de una onda sonora, suele representarse como rayos y se llaman frente de onda. Las ondas se refractan o son absorbidas cuando el rayo de onda incide en un área determinada, esto ocurre en función del material por usar.

Si el área de impacto tiene una forma geométrica determinada, entonces la onda puede converger en un punto o diverge dispersándose en varias direcciones.

1.16. Interferencia de ondas

Según sea el desfase que exista entre dos ondas sinusoidales puede ocurrir un desfase en el cual se anulen las amplitudes o puede haber un desfase en el cual se amplifiquen las amplitudes.

1.17. Interferencia constructiva

Las ondas que estén superpuestas alcanzarán un máximo de amplitud siempre que estén en fase.

1.18. Interferencia destructiva

Las ondas que estén superpuestas pero desfasadas media longitud de onda una respecto de la otra, anularán sus amplitudes y se tendrá una amplitud mínima.

2. RESONANCIA MECÁNICA

2.1. Fenómeno de resonancia mecánica

El fenómeno de resonancia mecánica genera amplificación de la vibración debido a que las frecuencias de dos cuerpos son iguales. Se da cuando un cuerpo vibra a una frecuencia fundamental y entra en contacto por conducción o convección o ambas con un segundo cuerpo afinado, naturalmente a una frecuencia armónica o frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental.

El efecto que el fenómeno de resonancia induce es un estado de amplitud máxima, catalogado como un estado de máxima excitación de la vibración. En aplicaciones musicales este fenómeno es la base para brindar distintas posibilidades artísticas para el instrumentista. En aplicaciones industriales, las consecuencias pueden ser desastrosas debido a que estructuras, cimentaciones, elementos mecánicos, están sometidos a amplitudes mayores incluso para las cuales no fueron diseñadas y que pueden hacer que un material falle por fatiga. En estos casos se evita que los cuerpos entren en resonancia.

2.2. Cajas de resonancia

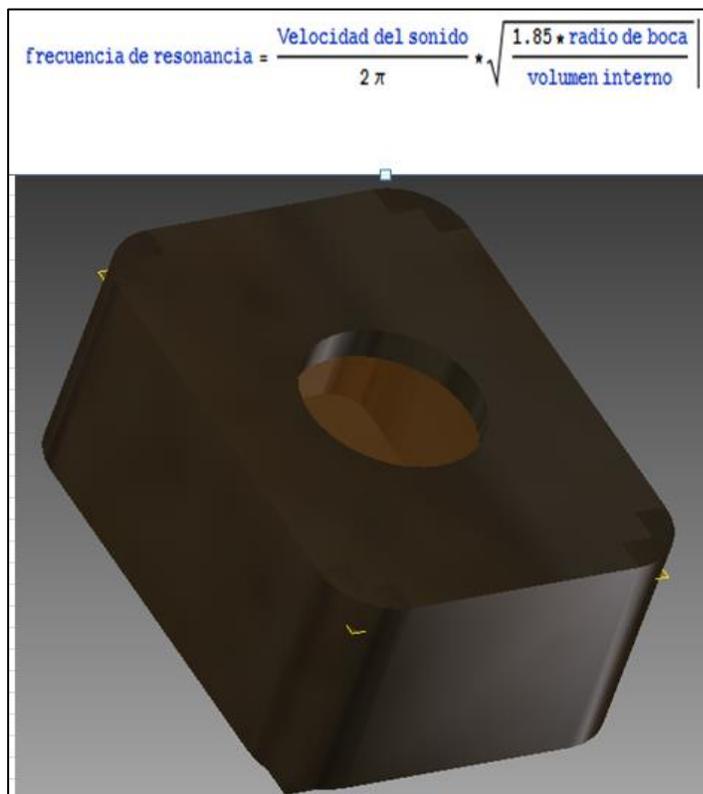
Una caja de resonancia es una estructura diseñada para amplificar sonidos musicales, tal es el caso de las marimbas, las guitarras, el violín, y otros. Su diseño resulta ser muy elaborado y en muchas situaciones difíciles debido a que, en su mayoría, requiere de una delicada manufactura para que

las frecuencias a las que pueda vibrar la caja sean valores exactos, según sea un instrumento musical temperado o uno no temperado.

2.3. Resonador de Helmholtz

Es una cavidad con un orificio con o sin cuello en cuyo interior el aire se comporta como una masa resonante. La frecuencia de resonancia a la que vibra el resonador sin cuello se puede calcular de la siguiente manera:

Figura 5. **Cálculo de frecuencia de resonancia de una caja sin cuello**



Fuente: elaboración propia, empleando Paint, Inventor 2013 y Wolfram Math 8.

Una caja de resonancia es similar a un sistema masa resorte donde la masa de aire que se encuentra en el cuello de la boca del resonador vibra de forma restitutiva gracias a la acción del volumen interno de aire que se encuentra dentro de la cavidad. En el caso de una caja que no tenga cuello se considera una variación de la ecuación original que permite encontrar la frecuencia a la cual la masa de aire vibrará.

2.4. Resonador múltiple de Helmholtz

Un resonador múltiple es una cavidad capaz de tener dos o más frecuencias a las cuales entra en resonancia. Estas cajas de resonancia atenúan otras frecuencias que no son las de resonancia.

2.5. Materiales aptos para la construcción de cajas de resonancia

Para la construcción de cajas de resonancia se buscan materiales que posean un alto módulo de elasticidad y baja densidad debido a que poseen mejores propiedades para transmitir el sonido.

2.6. Análisis modal de las cajas de resonancia

Este análisis busca representar los desplazamientos que ocurren en una placa sometida a determinadas frecuencias. Actualmente, se pueden realizar estos análisis mediante el uso correcto de determinado software y así conseguir un patrón de vibración que represente de forma teórica el modelo de vibración.

2.7. Método del elemento finito para el análisis modal de las placas vibratorias

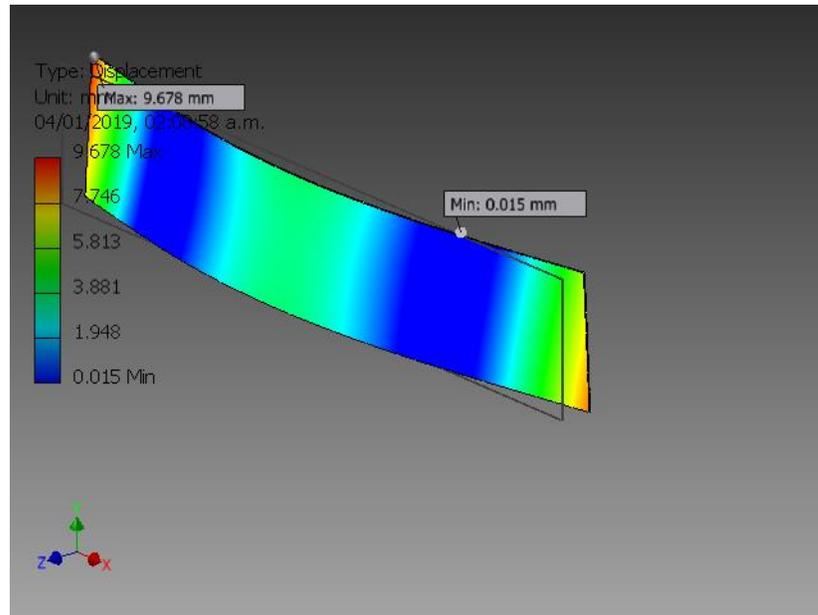
Este método es un análisis numérico que resuelve ecuaciones diferenciales parciales de alta dificultad resultantes de problemas físicos en los cuales las formas de los objetos son complejas y en los que se necesita conocer el efecto de agentes externos.

2.8. Patrón de vibración en placas vibratorias ante una fuente de excitación

Los patrones de vibración que ocurren en una placa vibratoria fueron descubiertos por el científico Ernst Chladni y son una representación de los puntos que vibran con mayor amplitud en una placa y las líneas que se pueden apreciar en las placas son puntos que no vibran debido a que son nodos.

Actualmente, este experimento se puede simular en aplicaciones de ingeniería mecánica con el fin de predecir el comportamiento de membrana o placa vibratoria antes de su fabricación y ensayo.

Figura 6. **Simulación del patrón de vibración de una placa vibratoria**



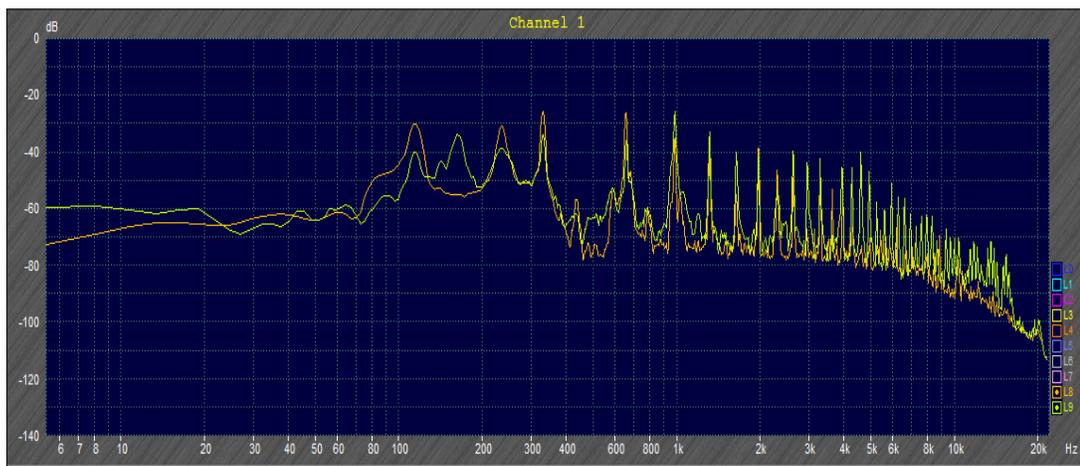
Fuente: elaboración propia, empleando Inventor 2013.

3. ANÁLISIS DE SEÑALES ACÚSTICAS

3.1. Análisis de Fourier para descomposición de señales acústicas complejas

El análisis de Fourier es de utilidad para encontrar el contenido de frecuencias armónicas que acompañan a una frecuencia fundamental. Este análisis fue desarrollado por el científico Francois Fourier, quien en la actualidad se ha desarrollado software con algoritmo capaz de descomponer una señal periódica en sus respectivos componentes fundamentales y armónicas.

Figura 7. **Descomposición de la frecuencia de 329 Hz en dos cuerdas distintas de una guitarra clásica**



Fuente: elaboración propia, empleando Oscillometerxz.

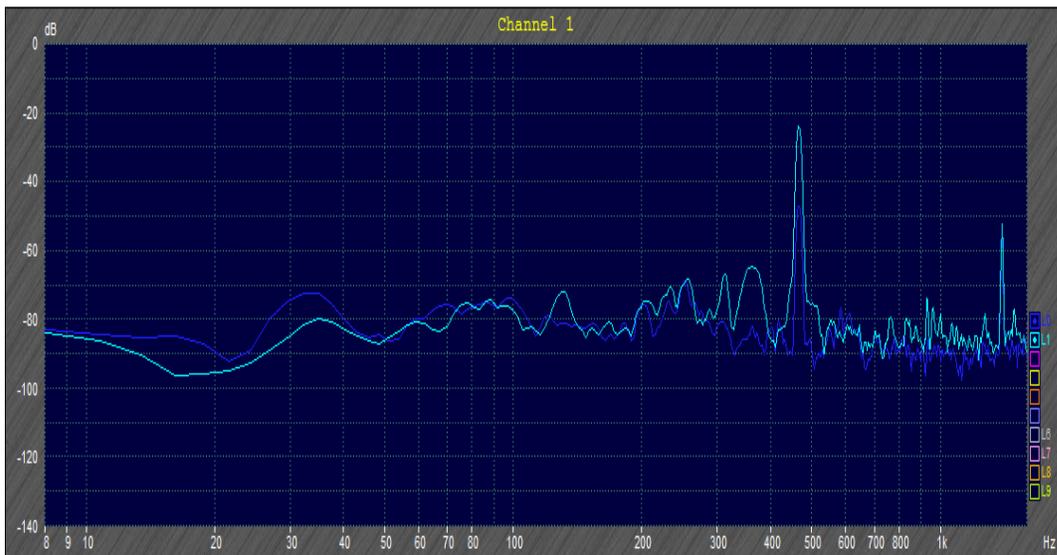
3.2. Espectro de amplitud

Este diagrama presenta la magnitud de la amplitud en decibeles y sirve para identificar el pico máximo, el pico mínimo, el valor eficaz o RMS de la muestra en análisis.

3.3. Espectro de frecuencias

El espectro de frecuencias aplica la transformada discreta de Fourier para encontrar las frecuencias que componen la onda compuesta. La transformada discreta convierte una onda que oscila en el tiempo a sus componentes en hercios que conforman la onda.

Figura 8. **Descomposición del espectro de una caja de resonancia circular al ser golpeada manualmente**



Fuente: elaboración propia, empleando Oscillometerxz.

3.4. Espectro de fase

Este diagrama sirve para medir la magnitud del desfase en el tiempo de dos ondas que están propagándose simultáneamente. La función principal es identificar la magnitud del desfase para luego corregirlo.

3.5. Medición de la potencia sonora de una fuente de sonido

La potencia sonora se puede medir a partir de la intensidad multiplicada por el área superficial que es irradiada por la onda sonora. Para obtener un resultado congruente es necesario tener el valor de la intensidad en vatios por metro cuadrado.

3.6. Software para analizar las señales acústicas

La función básica que debe tener el software por usar es que aplique la transformada discreta de Fourier. El software por utilizar debe ser compatible con la tarjeta de sonido que se vaya a emplear y debe poseer la propiedad de calibrar el sistema de grabación previo a la toma de sonido.

3.7. Espectro sonoro del ruido rosa

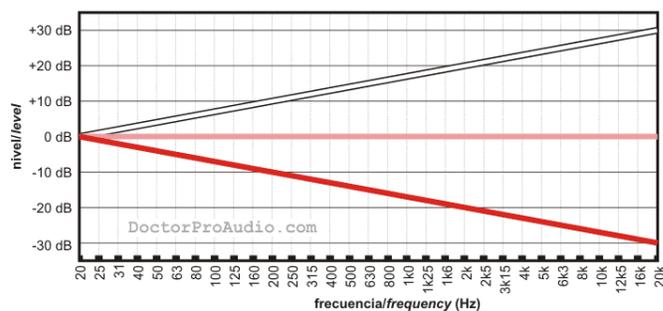
El ruido rosa cae 3 decibeles por octava, en otras palabras, la intensidad con la que se perciba una nota DO3 será 3 decibeles menor que la intensidad con la que se perciba una nota DO2, el sonido que el oído interpreta al estar expuesto a ruido rosa es bajos y agudos. Cuando se compara el sonido del ruido rosa contra el sonido del ruido blanco se percibe que el ruido blanco destaca más los agudos que los bajos.

El ruido blanco se usa para analizar y ecualizar espacios grandes, salas de concierto y teatros, ya que por medio de su gráfica permite balancear todas las frecuencias para que tengan la misma potencia sonora.

El ruido rosa es utilizado para analizar y ecualizar la respuesta acústica de una cavidad de los instrumentos musicales ya que permite identificar los picos de resonancias o anti resonancias de la frecuencia interna del aire de forma práctica. Para analizar una caja de resonancia con ruido rosa se debe observar un pico de resonancia, si el valor de la frecuencia pico del aire interno está desplazado hacia la derecha o la izquierda de la frecuencia de diseño indica que la caja necesita ser ajustada para vibrar con una ganancia máxima de decibeles.

En la figura 9 obtenida con un analizador tipo RTA el espectro del ruido blanco es ascendente, razón por la cual las notas altas se perciben más destacadas que los bajos, el ruido rosa se observa plano y el ruido rojo se observa decreciente. Así mismo, los colores de las curvas hacen referencia al tipo de ruido que representan.

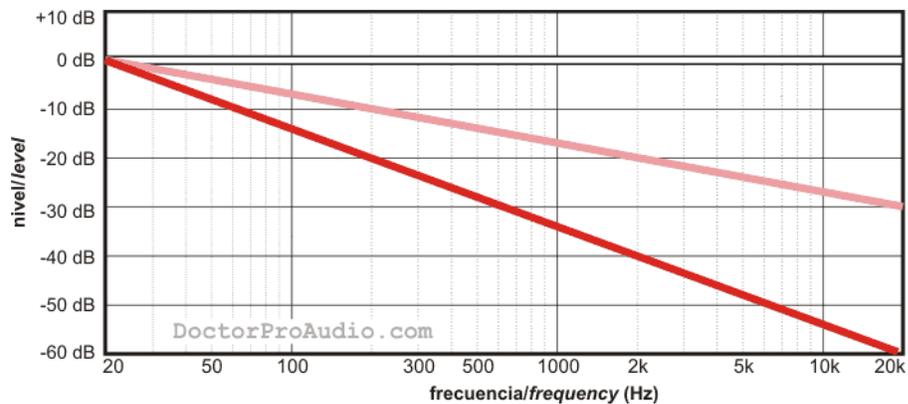
Figura 9. **Ruido blanco, rosa y rojo visto en un analizador tipo RTA**



Fuente: DoPA. *Ruido rosa, blanco y rojo*. <https://www.doctorproaudio.com/content.php?153-ruido-rosa-blanco-y-rojo>. Consulta: 13 de marzo de 2019.

En la figura 10 se ve que al usar un analizador tipo FFT el espectro del ruido blanco es plano, el ruido rosa se observa decreciente con pendiente negativa de -3 dB por octava y el ruido rojo se observa decreciente con pendiente negativa de -6 dB por octava. Así mismo, los colores de las curvas hacen referencia al tipo de ruido que representan.

Figura 10. **Ruido blanco, rosa y rojo visto en un analizador tipo FFT**



Fuente: DoPA. *Ruido rosa, blanco y rojo*. <https://www.doctorproaudio.com/content.php?153-ruido-rosa-blanco-y-rojo>. Consulta: 13 de marzo de 2019.

Las frecuencias altas se perciben con menor intensidad sonora aunque tengan la misma potencia media, debido a que la intensidad sonora es directamente proporcional a la amplitud de desplazamiento de la vibración y esta amplitud, a su vez, es inversamente proporcional a la frecuencia del sonido.

En otras palabras a mayor frecuencia menor magnitud de amplitud de desplazamiento de la vibración y a menor amplitud de desplazamiento menor intensidad. Es necesario tener en cuenta que el oído humano es más sensible a bajas frecuencias que a altas frecuencias.

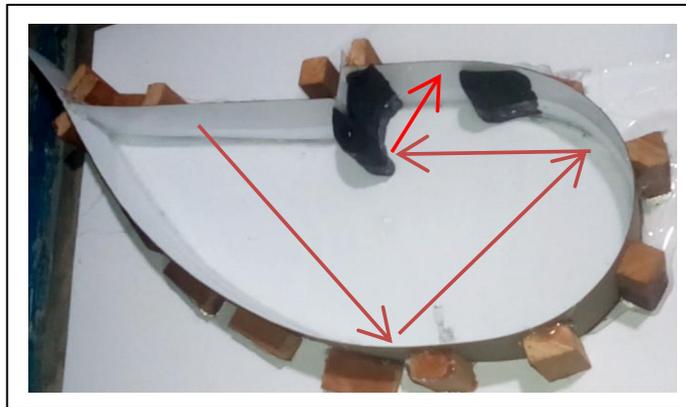
Un analizador RTA o un analizador FFT pueden ser de utilidad siempre y cuando se sepan interpretar las gráficas, los detalles del software y se tenga claro la aplicación para la cual se usará, sea un espacio grande como un recinto o un espacio pequeño como una caja de resonancia.

4. DISEÑO EXPERIMENTAL

4.1. Reflexión de ondas de agua dirigidas hacia un punto focal

Las ondas se reflejan y pueden dispersarse o re direccionarse según sea la superficie donde incide el frente de onda. En este experimento se observa la dirección hacia la cual se dirige el frente de onda y el propósito es buscar que las ondas se concentren en un punto que para este caso es la boca del resonador. El perfil de la caja de resonancia se diseña a partir de este principio usando contornos parabólicos y curvas que eliminen los ángulos agudos para disminuir las pérdidas por choque.

Figura 11. Frente de onda atravesando el resonador usando agua como medio para transportar energía



Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2010.

Para diseñar los perfiles finales de las cajas de resonancia se realizaron varias iteraciones partiendo de contornos formados por figuras geométricas básicas.

Tabla I. **Primera iteración de los perfiles de los resonadores**

Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
		

Fuente: elaboración propia.

Tabla II. Segunda iteración de perfiles aplicando contornos parabólicos

Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
		

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. Tercera iteración de los perfiles de los resonadores

Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
		

Fuente: elaboración propia.

4.2. Análisis de eficiencias energéticas de las cajas de resonancia usando como base el modelo de la prensa de pascal

En esta fase se busca analizar cuanta presión de aire se logra aprovechar a la salida de la cámara hermética según el diseño propuesto.

La cámara hermética se elaboró de poliestireno expandido conocido en Guatemala como duroport y se formó la cámara de aire usando bolsa plástica. Las uniones del duroport con la bolsa se sellaron con silicón y se colocaron paredes de *plexiglass* a los costados.

Tabla IV. **Cámaras herméticas de los resonadores de Helmholtz propuestos**

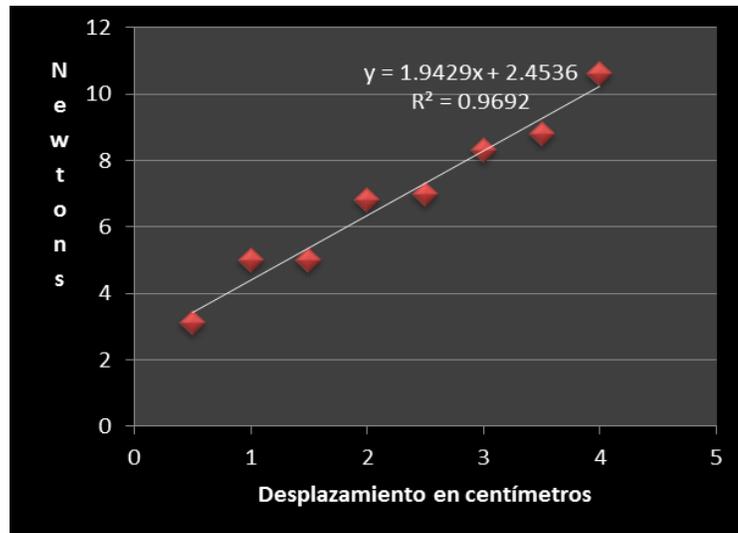
Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
		

Fuente: elaboración propia.

Se utilizó un sistema de dos resortes en paralelo cuya función es impactar la membrana que estará en contacto con el cuerpo en vibración. Los valores para generar la gráfica Newtons frente a centímetros del sistema masa resorte

fueron obtenidos a partir de una verificación en el laboratorio de Transcold Ingeniería Guatemala.

Figura 12. **Gráfica de fuerza contra elongación del sistema de resortes**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2010.

Se colocó una regla graduada en el sistema masa resorte para saber la magnitud de la fuerza que entra al sistema.

Figura 13. **Sistema masa resorte acoplado a la cámara hermética**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2010.

A la salida de la boca de la cámara se adaptó un manómetro de presión electrónico para la tarjeta Arduino. La manguera se conectó en la entrada superior para toma de lecturas positivas de presión.

Figura 14. **Sensor de presión diferencial MPXV7002DP**



Fuente: elaboración propia.

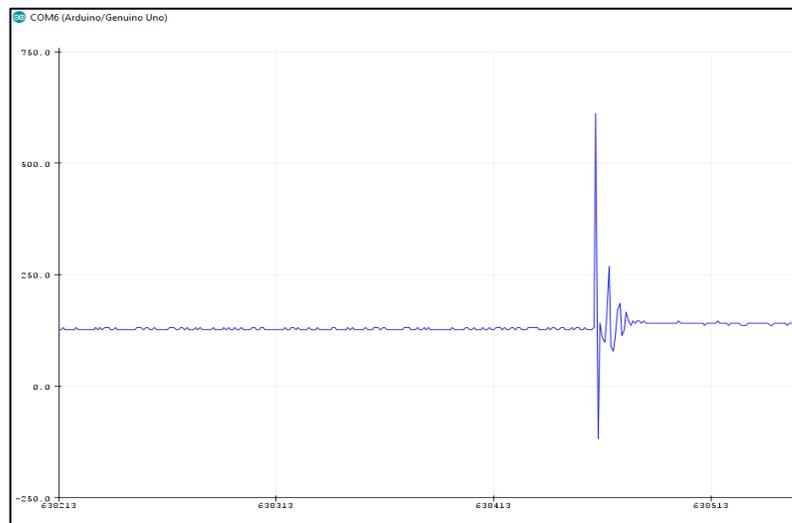
Se utilizó una tarjeta Arduino para analizar la señal del sensor y se convirtió la señal de entrada en pascales de presión.

Figura 15. **Tarjeta Arduino uno**



Fuente: elaboración propia.

Figura 16. **Visualización de la presión diferencial con el software de Arduino**



Fuente: elaboración propia, empleando Arduino IDE.

Figura 17. **Código de programación cargado a la tarjeta Arduino uno**

```
// the setup routine runs once when you press reset:
float pressure; //
int mpx = 0; //
void setup() {
  // initialize serial communication at 9600 bits per second:

  Serial.begin(9600);
}

// the loop routine runs over and over again forever:
void loop() {
  // read the input on analog pin 0:
  pressure = analogRead(mpx);

  pressure = (5.0*pressure-2560.0)/1.024;
  // print out the value you read:
  Serial.println(pressure);
  // Salto de línea
  Serial.print("\n");

  delay(1);      // delay in between reads for stability
}
```

Fuente: elaboración propia, empleando Arduino IDE.

4.3. Uso del ruido rosa para simular el espectro de los amplificadores acústicos

Para generar los espectros de frecuencias de las cámaras herméticas de aire se llevaron a cabo las siguientes condiciones:

Tabla V. **Condiciones aplicadas para obtener los espectros de frecuencias de las cámaras herméticas**

Condiciones generales	Simulación de espectros de amplificación			
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 3 con material reflector
Frecuencia	1500 Hz	1500 Hz	1500 Hz	230 Hz
Tipo de ruido	rosa	rosa	rosa	rosa
Distancia entre bocina y micrófono	3 cm	3 cm	3 cm	4 cm
Distancia entre bocina y membrana	3 cm	3 cm	3 cm	4 cm
Distancia entre micrófono y salida	3 cm	3 cm	3 cm	4 cm
Micrófono	electret	electret	electret	electret
Generador de señal para smartphone	Signal generator Random soft	Signal generator Random soft	Signal generator Random soft	Signal generator Random soft
Ganancia de bocinas	Máxima	Máxima	Máxima	Máxima
Ganancia en el generador	Máxima	Máxima	Máxima	Máxima
Ubicación en software	R6	R5	R7	L3

Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2010.

Las mediciones realizadas a la bocina con el micrófono electret sirven para obtener el espectro natural que ingresa al resonador.

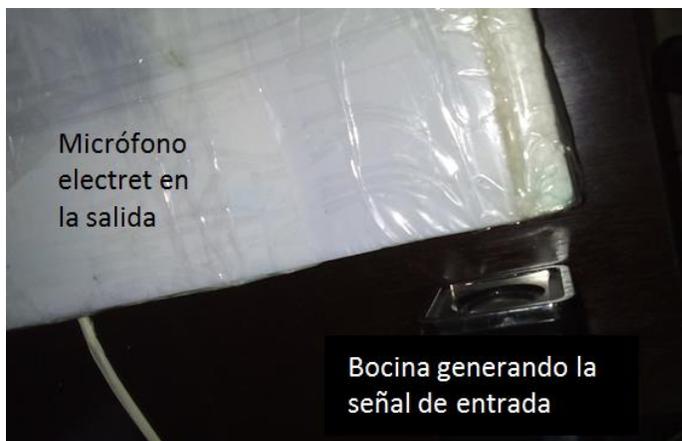
Figura 18. **Medición del espectro de frecuencias generado por la bocina**



Fuente: elaboración propia.

Las mediciones realizadas a la salida del resonador sirven para analizar qué incidencia tuvo el resonador sobre el espectro original entrante.

Figura 19. **Medición del espectro de frecuencias generado por la cámara hermética**

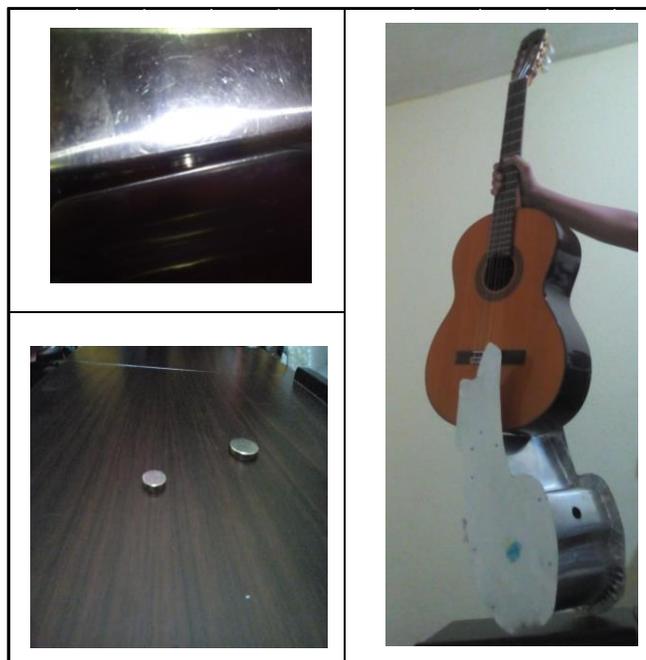


Fuente: elaboración propia.

4.4. Forma de transmisión de la vibración mecánica de la guitarra clásica al resonador de Helmholtz

El concepto utilizado es que la velocidad del sonido es proporcional a la tensión del elemento transmisor, este concepto se aplica al experimento simple de unir dos vasos con un cordón y, a medida que la cuerda tiene más tensión, es capaz de transmitir mejor el sonido. En este experimento se usaron tres imanes de neodimio colocados uno dentro del cuerpo de la guitarra en análisis, otro dentro del resonador adaptable y un tercer imán entre el acople de las dos cajas de resonancia.

Figura 20. **Acople del costado de la guitarra con el resonador mediante imanes de neodimio**



Fuente: elaboración propia.

5. RESULTADOS

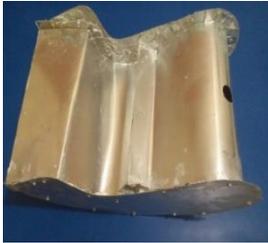
Las 3 cajas de resonancia fabricadas presentaron distintas características en la simulación con cámaras herméticas. El modelo 1 teóricamente tiene que entregar una ganancia de decibeles alta ante una fuerza baja en comparación con el modelo 2 y modelo 3. Esto quiere decir que será más fácil generar sonido con alta ganancia de decibeles aplicando pequeñas fuerzas. El porcentaje es la división de la presión de salida en la boca del resonador entre la presión de entrada en la membrana del resonador. La presión de entrada es la fuerza de resorte aplicada dividido el área que impacta.

Tabla VI. **Eficiencias de energía aprovechada para cada modelo de resonador propuesto**

Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Eficiencia de presión	Eficiencia de presión	Eficiencia de presión
20 %	14 %	14 %

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Espectros de frecuencias para el primer prototipo**

Modelo 1	
Cámara de aire simulada	Modelo real
	

Fuente: elaboración propia.

En la figura 21 la gráfica en color celeste claro es el sonido saliente que se obtiene en la boca de la cámara de aire simuladora 1 y en color naranja se aprecia el ruido rosa que entra a la caja. Se aprecia que a 340 Hz aparece la primera frecuencia destacada, la frecuencia resonante inmediata superior es de 600 Hz, la tercer frecuencia de resonancia inmediata superior es de 1 667 Hz.

Figura 21. **Ruido rosa y espectro de frecuencias del aire interno de la cámara hermética del modelo 1**



Fuente: elaboración propia, empleando Oscillometerxz.

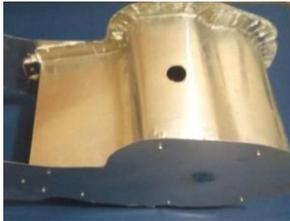
En la figura 22 el espectro real a la salida de la boca del modelo real 1 se identifica en color rosado. Se aprecia que a 112 Hz y a 128 Hz aparecen las primeras frecuencias de resonancia; la frecuencia resonante inmediata superior es de 219 Hz, la tercera frecuencia de resonancia inmediata superior es de 2 600 Hz.

Figura 22. **Espectro de frecuencias real del aire interno del modelo 1**



Fuente: elaboración propia, empleando Oscillometerxz

Tabla VIII. **Espectros de frecuencias para el segundo prototipo**

Modelo 2	
Cámara de aire	Modelo real
	

Fuente: elaboración propia.

En la figura 23 el espectro simulado que se obtiene a la salida de la boca de la cámara hermética simuladora del modelo 2 está en color azul claro y el espectro del ruido rosa, que es el sonido original que entra al resonador, en color naranja.

Se aprecia que a 143 Hz aparece la primera frecuencia de resonancia, la frecuencia resonante inmediata superior es de 1 470 Hz, la tercera frecuencia de resonancia inmediata superior es de 1 618 Hz.

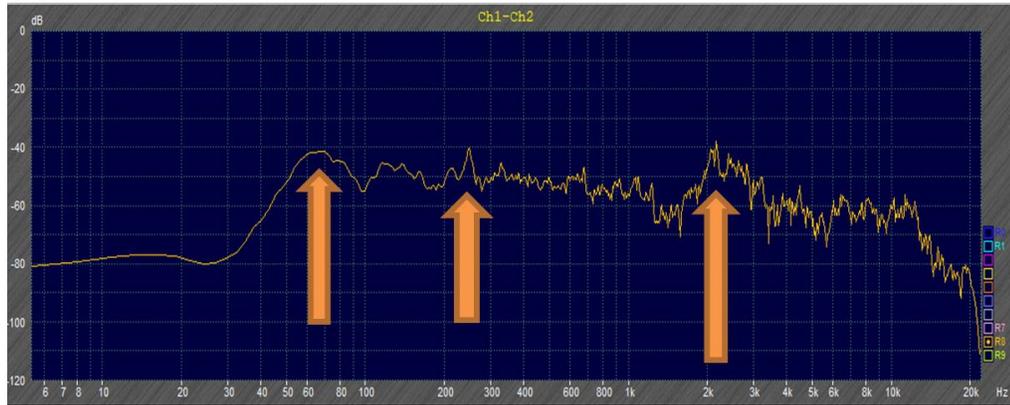
Figura 23. **Ruido rosa y espectro de frecuencias del aire interno de la cámara hermética del modelo 2**



Fuente: elaboración propia, empleando Oscillometerxz.

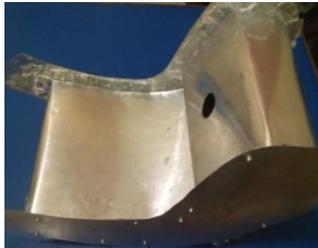
En la figura 24 el espectro resultante en la salida de la boca del modelo real 2 se identifica en color amarillo. Se aprecia que a 66 Hz aparece la primera frecuencia de resonancia, la frecuencia resonante inmediata superior es de 250 Hz, la tercera frecuencia de resonancia inmediata superior es de 2 156 Hz.

Figura 24. **Espectro de frecuencias real del aire interno del modelo 2**



Fuente: elaboración propia, empleando Oscillometerxz.

Tabla IX. **Espectros de frecuencias para el tercer prototipo**

Modelo 3	
Cámara de aire	Modelo real
	

Fuente: elaboración propia.

En la figura 25 se muestra el espectro registrado a la salida de la cámara hermética simuladora del modelo 3 en color rosado contra el espectro del ruido rosa entrante al prototipo en color naranja. Se aprecia que a 270 Hz aparece la primera frecuencia resonancia, la frecuencia resonante inmediata superior es de 527 Hz, la tercera frecuencia de resonancia inmediata superior es de 850 Hz.

Figura 25. **Ruido rosa y espectro de frecuencias del aire interno de la cámara hermética del modelo 3**



Fuente: elaboración propia empleando Oscillometerxz.

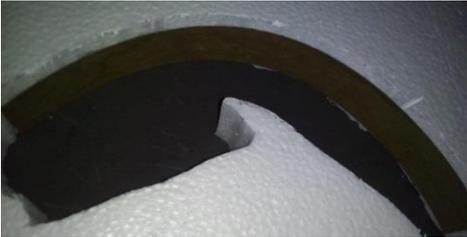
En la figura 26 se muestra el espectro real a la salida de la boca del modelo 3 en color verde claro, se aprecia que a 110 Hz aparece la primera frecuencia de resonancia, la frecuencia resonante inmediata superior es de 497 Hz, la tercera frecuencia de resonancia inmediata superior es de 1 733 Hz.

Figura 26. **Espectro de frecuencias real del aire interno del modelo 3**



Fuente: elaboración propia empleando Oscillometerxz.

Tabla X. **Espectros de frecuencias para el tercer prototipo empleando *plywood* en el interior de la cámara hermética de simulación**

Modelo 3	
Cámara de aire con <i>plywood</i>	Modelo real
	

Fuente: elaboración propia.

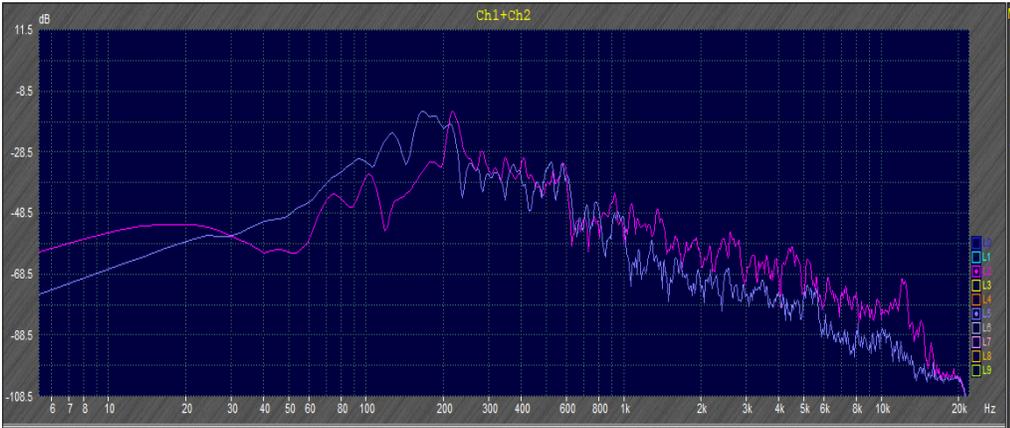
En la figura 27 el espectro a la salida de la boca de la cámara hermética del modelo 3 se identifica en color amarillo frente al espectro del ruido rosa entrante a la cámara identificado en color violeta. Se aprecia que a 356 Hz aparece la primera frecuencia resonancia; la frecuencia resonante inmediata superior es de 619 Hz, la tercera frecuencia de resonancia inmediata superior es de 819 Hz.

Figura 27. **Ruido rosa y espectro de frecuencias del aire interno de la cámara hermética del modelo 3 empleando material reflector en el interior**



Fuente: elaboración propia empleando Oscillometerxz.

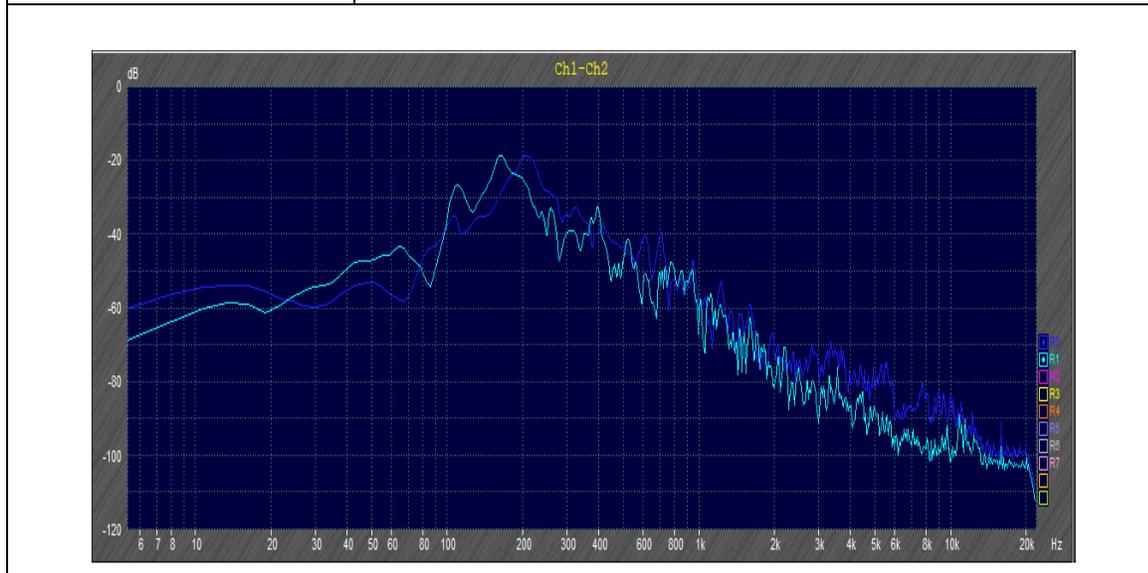
Tabla XI. **Espectros de amplificación en la primera guitarra**

Guitarra de cedro Miguel Hernández	Detalles
	<p>Espectro sonoro de la estructura de la guitarra en color violeta obtenido golpeando el puente con el pulgar. La frecuencia pico es de 215 728 Hz con una amplitud de -15 124 dB.</p> <p>Espectro sonoro del acople del resonador 3 y la guitarra clásica en color azul obtenido golpeando el puente con el pulgar. La frecuencia pico es de 165 459 Hz con una amplitud de -15., dB.</p> <p>La frecuencia del aire del resonador 3 es de 110 275 Hz y la frecuencia del aire de la guitarra es de 98 095 Hz. La frecuencia de la estructura del resonador 3 es de 165 Hz con amplitud de -6 416 dB. La guitarra ahora presentará mejores graves pero se aprecia una disminución de los agudos considerable. La frecuencia de la estructura de la guitarra se ha vuelto más grave sin presentar pérdida de decibeles.</p>
	

Fuente: elaboración propia, empleando Oscillometerxz.

Tabla XII. **Espectros de amplificación en la segunda guitarra**

Guitarra Yamaha C-40-M	Detalles
	<p>Espectro sonoro de la estructura de la guitarra en color azul obtenido golpeando el puente con el pulgar. La frecuencia pico es de 204 261 Hz con una amplitud de -18 234 dB.</p> <p>Espectro sonoro del acople del resonador 3 y la guitarra clásica en color celeste obtenido golpeando el puente con el pulgar. La frecuencia pico es de 164 173 Hz con una amplitud de -18 656 dB.</p> <p>La frecuencia del aire del resonador 3 es de 110 275 Hz y la frecuencia del aire de la guitarra es de 106 886 Hz. La frecuencia de la estructura del resonador 3 es de 165 Hz con amplitud de -6 416 dB. La guitarra presenta mejoras en sus bajos pero no en los agudos y la frecuencia de la estructura ahora es más grave sin presentar pérdida de decibeles.</p>



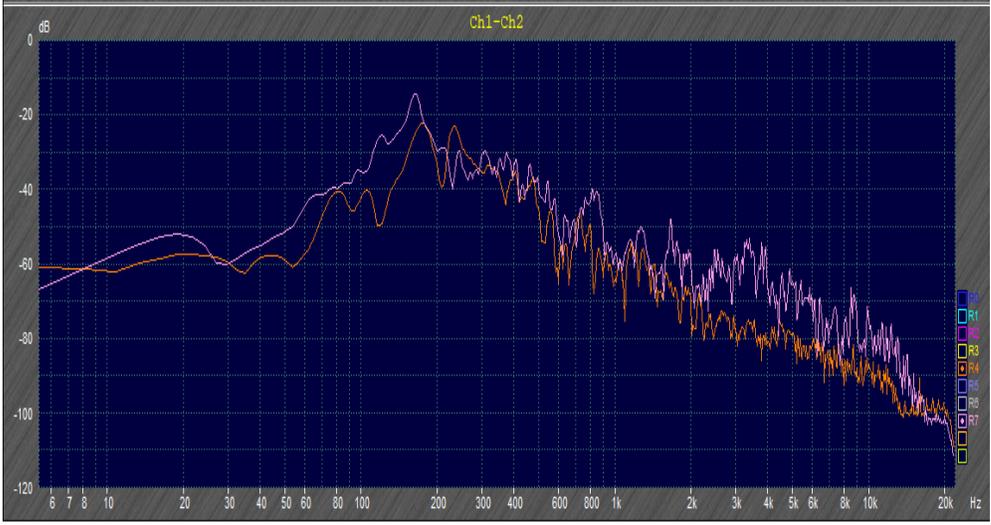
Fuente: elaboración propia, empleando Oscillometerxz.

Tabla XIII. **Espectros de amplificación en la tercera guitarra**

Guitarra Takamine G-128-S	Detalles
	<p>Espectro sonoro de la estructura de la guitarra en color violeta obtenido golpeando el puente con el pulgar. La frecuencia pico es de 236 903 Hz con una amplitud de -14 013 dB.</p> <p>Espectro sonoro del acople del resonador 3 y la guitarra clásica en color amarillo obtenido golpeando el puente con el pulgar. La frecuencia pico es de 240 629 Hz con una amplitud de -16 545 dB.</p> <p>La frecuencia del aire del resonador 3 es de 110 275 Hz y la frecuencia del aire de la guitarra es de 111 462 Hz. La frecuencia de la estructura del resonador 3 es de 165 Hz con amplitud de -6 416 dB. La zona grave es amplificada pero los agudos aún presentan pérdidas. Ahora la frecuencia de la estructura de la guitarra sí presenta un leve decremento de decibeles pero es más aguda.</p>
	

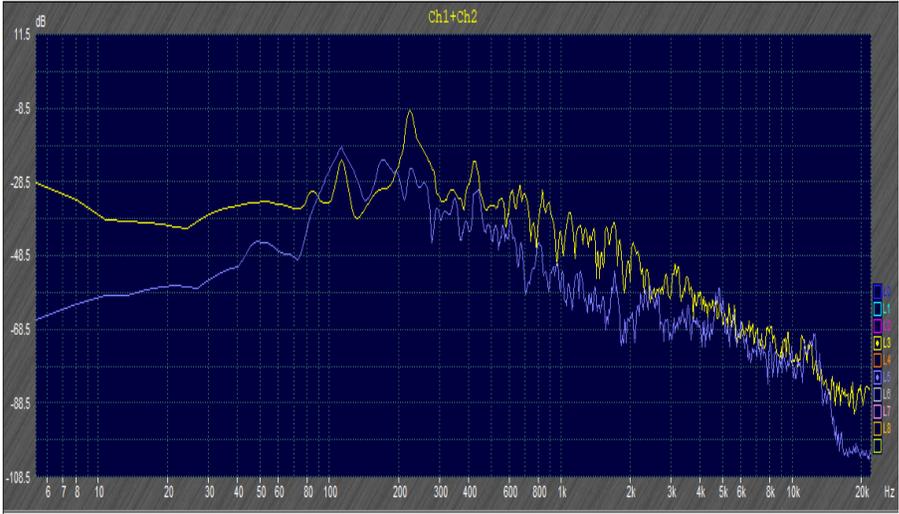
Fuente: elaboración propia, empleando Oscillometerxz.

Tabla XIV. **Espectros de amplificación en la cuarta guitarra**

Guitarra Alhambra 4p	Detalles
	<p>Espectro sonoro de la estructura de la guitarra en color naranja obtenido golpeando el puente con el pulgar. La frecuencia pico es de 173 389 Hz con una amplitud de -22 032 dB.</p> <p>Espectro sonoro del acople del resonador 3 y la guitarra clásica en color violeta obtenido golpeando el puente con el pulgar. La frecuencia pico es de 164 173 Hz con una amplitud de -14 013 dB.</p> <p>La frecuencia del aire del resonador 3 es de 110 275 Hz y la frecuencia del aire de la guitarra es de 98 863 Hz. La frecuencia de la estructura del resonador 3 es de 165 Hz con amplitud de -6 416 dB. Hay 7 decibeles de ganancia en la frecuencia pico de la estructura, la zona grave ha sido amplificada y también la zona aguda.</p>
	

Fuente: elaboración propia, empleando Oscillometerxz.

Tabla XV. **Espectros de amplificación en la quinta guitarra**

Guitarra Ibanez GA3-AM-3U-04	Detalles
	<p>Espectro sonoro de la estructura de la guitarra en color amarillo obtenido golpeando el puente con el pulgar. La frecuencia pico es de 222 567 Hz con una amplitud de -8 dB.</p> <p>Espectro sonoro del acople del resonador 3 y la guitarra clásica en color azul claro obtenido golpeando el puente con el pulgar. La frecuencia pico es de 112 010 Hz con una amplitud de -18 982 dB.</p> <p>La frecuencia del aire del resonador 3 es de 110 275 Hz y la frecuencia del aire de la guitarra es de 108 Hz. La frecuencia de la estructura del resonador 3 es de 165 Hz con amplitud de -6 416 dB. Se obtuvo una pérdida grande de todo el espectro sonoro amplificando levemente la zona grave.</p>
	

Fuente: elaboración propia, empleando Oscillometerxz.

Tabla XVI. **Frecuencias de las estructuras en estudio**

Guitarra	Frecuencia de la estructura	Decibeles
Miguel Hernández	215,728 Hz	-15,124 dB
Yamaha C-40-M	204,261 Hz	-18,234 dB
Takamine G-128s	236,093 Hz	-14,013 dB
Alhambra 4P	173,389 Hz	-22,032 dB
Ibanez GA3-AM-3U-04	222,567 Hz	-8,000 dB

Espectro de la estructura del resonador 3: frecuencia de 165 Hz a -6,416 dB.



Fuente: elaboración propia, empleando Oscillometerxz.

Tabla XVII. Intervalo de frecuencias que son amplificadas en el rango de octava en estudio

Número de muestra	Estadístico	Frecuencias en el rango de octava de 103,8 Hz a 146,8 Hz						
		103,8	110	116,5	123,5	130,8	138,6	146,8
5	w (-)	0	0	0	0	0	0	0
	w crítico	1	1	1	1	1	1	1

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Tabla XVIII. Intervalo de frecuencias que no son amplificadas en el rango de octava en estudio

Número de muestra	Estadístico	Frecuencias en el rango de octava de 73,4 Hz a 98 Hz					
		73,4	77,8	82,4	87,3	92,5	98
5	w (-)	4	3	5	4	2	
	w crítico	1	n/a	1	1	1	n/a

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Tabla XIX. **Guitarras que fueron amplificadas en el rango de 73,4 Hz a 146,8 Hz**

Marca de guitarra	W positivo	Número de diferencias distintas a cero	Valor obtenido a un nivel de confianza del 10,8 % para n=13 y 10,3 % para n=11	¿Ocurre amplificación en todo el rango?
Miguel Hernández	91	13	64	Si
Yamaha c-40	48	11	48	Si
Alhambra 4p	91	13	64	Si
Ibanez ga3-am-3u-04	58	13	64	No
Takamine g128s	91	13	64	Si

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

6. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El diseño del modelo 1, a pesar de tener la mayor eficiencia de presión, no presentó los mejores resultados al ser analizado puesto que el cincho de la caja se elaboró de dos piezas disminuyendo así las tensiones residuales que mantiene el cincho.

Los espectros en duroport son similares en la forma de la curva de amplificación a los espectros, pero desplazados en el espectro de frecuencias puesto que no tienen la misma geometría ni el mismo radio de boca, sin embargo, las frecuencias pico no se encuentran a la misma distancia en Hz. Al colocar material reflector dentro del prototipo de duroport se observa que distintas zonas que en modelo simulado se aprecian como pérdidas de decibeles son amplificadas debido a que el recubrimiento interno de fórmica es liso y permite que la onda rebote y no pierda energía en las paredes rugosas y porosas del duroport.

Los espectros sonoros registrados desde la tabla No. XI a la tabla No. XV muestran que cuando la frecuencia de resonancia de la estructura del prototipo adaptable es igual o muy cercana a la frecuencia del cuerpo de la estructura del instrumento musical la amplitud es máxima en todo el espectro sonoro, es decir, que al ser golpeadas ambas cajas deben emitir la misma frecuencia pico.

Los resultados mejoran cuando el aire interno de la cavidad del prototipo vibra a la misma frecuencia del aire interno de la cavidad de la guitarra clásica. La resonancia mecánica es máxima en estos casos y la superposición de las

ondas sonoras es constructiva debido a que las frecuencias pico del aire interno y de la estructura mecánica están en fase.

La zona grave en la muestra de las guitarras clásicas es amplificada en la mayoría de casos pero la zona aguda no es amplificada a excepción de la guitarra Alhambra 4 P, cuyo espectro de frecuencias se encuentra en la tabla XIV debido a que la frecuencia de la estructura del amplificador se acerca a la frecuencia de resonancia de la estructura de la guitarra.

La prueba de rango con signo de Wilcoxon se utilizó para encontrar una diferencia significativa en el aumento de decibeles en el rango de la segunda octava hacia la tercera octava de la nota “re” manteniendo el intervalo de semitonos en la escala temperada, esto se refiere a la escala cromática que va desde RE2 (73,4 Hz) hasta RE3 (146,8 Hz).

La frecuencia de resonancia del aire interno de la muestra de las guitarras y la frecuencia de resonancia del aire del prototipo se encuentran entre 98 Hz y 116 Hz y dichas notas graves están dentro del intervalo que va desde RE2 (73,4 Hz) hasta RE3 (146,8 Hz), razón por la cual se usó estadística inferencial para observar si la resonancia de las masas de aire produce un aumento significativo de decibeles.

La hipótesis nula establece que al usar el amplificador en la guitarra los decibeles por frecuencia son menores o iguales a los decibeles obtenidos sin usar el amplificador en el rango de octava de 73,4 Hz a 146,8 Hz.

La hipótesis alternativa establece que al usar el amplificador en la guitarra los decibeles por frecuencia son mayores que los decibeles obtenidos sin usar

el amplificador para el rango de octava de 73,4 Hz a 146,8 Hz. Se usó una muestra de 5 guitarras clásicas y un nivel de confianza del 5 %.

Se procedió nuevamente a aplicar la prueba de signos de Wilcoxon en cada guitarra para encontrar si el aumento de decibeles era mayor que el decremento de decibeles en el rango de la segunda octava de RE2 73,4 Hz hacia la tercera octava RE3 146,8 Hz.

CONCLUSIONES

1. Una guitarra clásica debe ser capaz de amplificar la zona comprendida entre 73,4 Hz y 987,8 Hz.
2. El principio de Pascal, junto con la reflexión de ondas, proporcionan al diseñador una guía eficaz para concentrar la energía en la boca del resonador y conseguir una ganancia óptima de decibeles. Es posible simular una caja de resonancia antes de fabricarla para analizar su espectro de frecuencias. Las tensiones residuales del resonador contribuirán a que haya una mayor velocidad del sonido en el material y al apoyar la caja de resonancia mediante soportes delgados en las orillas permitirá que las placas de los costados y el cincho puedan vibrar libremente.
3. Con base en la muestra analizada se observa que la mayoría de guitarras clásicas amplifican perfectamente la zona comprendida entre la segunda y tercera octava, particularmente las frecuencias que van desde RE 2 (73,4 Hz) que es la nota más grave que se afina en la sexta cuerda hasta B 3 (246,9 Hz), que es la nota que emite la segunda cuerda al aire. Pero la amplificación empieza a decaer posterior a la frecuencia de afinación de la estructura, estas son la cuarta octava y quinta octava, es decir, las frecuencias a partir de C 4 (261,6 Hz) hasta B 5 (987,8 Hz). Esto no siempre se cumple, ya que la tapa armónica, la construcción y desperfectos de los elementos que constituyen la caja de resonancia como conjunto influyen a que haya picos de resonancias o anti resonancias adicionales a este patrón de comportamiento.

4. Tomando como muestra el prototipo de resonador de Helmholtz número 3 se concluye que puede adaptarse a una guitarra clásica aplicando fuerzas de compresión entre las dos cajas por acoplar. Se comprobó que por medio del juego de imanes de neodimio es posible obtener una ganancia de decibeles puesto que los imanes de neodimio tienen altas propiedades de atracción magnética.

5. Con un nivel de confianza del 5 % se infiere que el prototipo del resonador número 3 fabricado amplificará la zona de frecuencias de la escala cromática que va desde G#2 (103,8 Hz) hasta RE3 (146,8 Hz) de cualquier guitarra manteniendo el intervalo de semitonos en la escala temperada. Esto se demuestra en la tabla No. XVII. Con un nivel de confianza del 5 % se concluye que el resonador fabricado no amplificará la zona de frecuencias de la escala cromática que va desde D2 (73,4 Hz) hasta G2 (98 Hz) en cualquier guitarra. Esto se demuestra en la tabla No. XVIII, ya que el valor de suma de rangos con observaciones negativas es mayor que el valor crítico. De una muestra de 5 guitarras fue posible amplificar el rango propuesto en 4 instrumentos. Cuando la frecuencia de la estructura del prototipo del resonador, es decir la frecuencia a la cual vibran las paredes y el cincho como conjunto es igual o cercana a la frecuencia de la estructura de la guitarra clásica, es posible amplificar el espectro completo de la guitarra. Si la frecuencia del aire interno de la cavidad del prototipo vibra a la misma frecuencia del aire interno de la cavidad de la guitarra clásica, entonces la ganancia de decibeles será máxima para todo el espectro de frecuencias, gracias a la superposición de ondas sonoras.

RECOMENDACIONES

1. Este estudio se puede realizar para otros instrumentos de cuerda y analizar si los espectros de frecuencias resultantes contribuyen al performance del intérprete mediante el uso de estadística inferencial cualitativa y cuantitativa.
2. Usar un sistema de amplificación electrónico dará una ganancia alta de decibeles, permitirá ecualizar el sonido, pero la calidad del sonido se pierde si el micrófono no es de alta sensibilidad y ocurren comúnmente pérdidas de la calidad del timbre, si la ecualización no es correcta se tendrá un desbalance de frecuencias que generarán una distorsión del sonido real. Sin embargo, un sistema de amplificación acústico permite fortalecer el timbre mediante la amplificación del espectro sonoro e incrementa la amplitud de los armónicos que acompañan a las notas fundamentales con fines para una sala de estudio.
3. Las cajas se fabricaron con aluminio de chapa delgada. La respuesta del resonador se puede evaluar aumentando la tensión del cuerpo para que la velocidad del sonido sea mayor. Se puede llevar a cabo usando tensores en los cinchos, cuerdas afinadas a la misma frecuencia de resonancia de la caja, golpeando las paredes del cincho para lograr el contorno deseado para que el material acumule tensiones residuales y estas favorezcan a la calidad sonora.

4. Las cajas se unieron con un material elastómero, pueden evaluarse los resultados usando materiales distintos y así analizar la incidencia del pegado de la caja en el espectro sonoro resultante.
5. Realizar un estudio sobre la percepción auditiva de instrumentistas y del público en general para demostrar que la ganancia de decibeles obtenida es significativa para la audiencia en una sala de concierto sin usar medios electrónicos.

BIBLIOGRAFÍA

1. ARAU, Higuini. *Acústica arquitectónica*. España: Ceac, 1999. 336 p.
2. Cambridge Sound Management. *Optimum Masking Sound: White or Pink?*. [en línea]. <<https://cambridgesound.com/wp-content/uploads/2013/02/Color-of-Noise.pdf>>. [Consulta: 9 de marzo de 2019].
3. DARDÓN CASTILLO, Víctor Hugo. *Estudio de maderas aptas para la construcción de las cajas de resonancia para marimbas*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2013. 49 p.
4. DEVORE, Jay. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. 7a ed. México: Cengage Learning, 2008. 723 p.
5. FLETCHER, Neville, y ROSSING, Thomas. *The physics of musical instruments*. 2a ed. USA: Springer, 1998. 756 p.
6. HERNÁNDEZ, Roberto; FERNÁNDEZ, Carlos y BAPTISTA, Pilar. *Metodología de la investigación*. 4a ed. México: McGraw-Hill, 2006. 850 p.
7. PERRY, Ian. *Sound radiation measurements on guitars and other stringed musical instruments. Doctor of philosophy*. Reino Unido: Cardiff University, 2014. 206 p.

8. RAMOS, Ignacio. *Historia de la guitarra y los guitarristas españoles*. Alicante, España: Editorial Club Universitario, 2013. 363 p.
9. RAO, Singiresu. *Vibraciones mecánicas*. 5a ed. México: Pearson Educación, 2012. 776 p.
10. RECINOS VALENZUELA, Efraín. *Remodelación del Teatro Nacional según la acústica de auditorios*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1975. 137 p.
11. Russell, Daniel. *Sound Fields Radiated by Simple Acoustic Sources*. [en línea]. <<https://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/rad2/mdq.html>>. [Consulta: 9 de marzo de 2019].
12. TORRES, Jesús. *El puente, modos de vibración y radiación sonora en frecuencias medias de la guitarra clásica*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2010. 79 p.
13. WALPOLE, Ronald; MYERS; Raymond; MYERS, Sharon y YE, Keying. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. 8a ed. México: Pearson Educación, 2012. 816 p.
14. YOUNG, Hugh, y FREEDMAN, Roger. *Física universitaria volumen 1*. 10a ed. México: Pearson Educación, 2009. 760 p.