

## RAE

1. **TIPO DE DOCUMENTO:** Trabajo de grado para optar por el título de INGENIERO DE SONIDO
2. **TÍTULO:** ANÁLISIS ACÚSTICO Y MODELAMIENTO DEL INSTRUMENTO QUIJADA DE CABALLO POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS
3. **AUTORES:** Adrián Davis Robinson
4. **LUGAR:** Bogotá, D.C
5. **FECHA:** Abril de 2017
6. **PALABRAS CLAVE:** Análisis Acústico, Análisis Modal, Elementos Finitos, Respuesta al Impulso, Respuesta en Frecuencia, Idiófono, Instrumento Quijada de Caballo, Módulos Elásticos.
7. **DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO:** La presente investigación tiene como objetivo principal describir el comportamiento acústico de la Quijada de Caballo, por medio del análisis experimental y modelamiento del instrumento, por el método de elementos finitos, dejando como resultado un modelo que podrá ser utilizado para estudios e investigaciones posteriores, en el campo de la Ingeniería de Sonido y en el estudio de instrumentos musicales.
8. **LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN:** Línea de investigación USB: Tecnologías actuales y sociedad. Sub línea de Facultad de Ingeniería: Análisis Acústico y procesamiento de señal. Campo temático del Programa de Acústica y audio.
9. **METODOLOGÍA:** Es de carácter empírico-analítico, basado en mediciones experimentales y modelamiento por el método de elementos finitos del instrumento musical Quijada de Caballo.
10. **COCLUCIONES:** La Quijada de caballo como instrumento musical posee características acústicas en su envolvente de Ataque rápido (0ms) y Decaimiento rápido (158ms), con variaciones en su amplitud marcadas en los primeros segmentos de tiempo entre 0ms y 20ms. Con una amplitud máxima en frecuencia de 25.8dbfs en 3.6khz. Se destacan frecuencias fundamentales en **635hz** y **823hz**. Y se identifican armónicos derivados de las fundamentales. Para la fundamental 635hz, armónicos en las frecuencias 1khz,1.8khz,2.3khz,3.2khz,3.6khz,5.4khz,8khz y para la fundamental 823hz armónicos en las frecuencias 1.6khz,2.3khz,3.2khz,4.1khz,5.9khz,8khz. Se determina a partir del análisis por elementos finitos que el instrumento Quijada de caballo posee un comportamiento modal predominante en las frecuencias entre 1khz - 10khz y se destacan rangos de frecuencias con aumentos en las deformaciones modales entre 600hz - 700hz, 1khz - 10khz y 8khz - 10khz. El Análisis por el método de elementos finitos demuestra ser una herramienta efectiva y precisa para simular y predecir el comportamiento acústico y de vibraciones de instrumentos musicales.

**ANÁLISIS ACÚSTICO Y MODELAMIENTO DEL INSTRUMENTO QUIJADA DE  
CABALLO POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

**ADRIAN DAVIS ROBINSON**

**UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**INGENIERIA DE SONIDO**

**BOGOTÁ**

**2017**

**Nota de aceptación:**

---

---

---

---

---

**Firma del presidente del jurado**

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**

Bogotá D.C. abril 21 de 2017

**Agradecimientos:**

---

---

---

---

## Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN.....	7
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	8
1.1 ANTECEDENTES.....	8
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	10
1.3 JUSTIFICACIÓN .....	10
1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	11
1.4.1 Objetivo general .....	11
1.4.2 Objetivos específicos .....	11
1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES DEL PROYECTO.....	11
1.5.1 Alcances.....	11
1.5.2 Limitaciones .....	11
2. MARCO DE REFERENCIA.....	12
2.1 MARCO TEÓRICO.....	12
2.1.1 Instrumentos Idiófonos.....	12
2.1.2 La Quijada de Caballo, instrumento idiófono.....	12
2.1.3 Anatomía de la Quijada de Caballo.....	12
2.1.4 Propiedades del sonido de la Quijada de Caballo.....	12
2.1.5 Gama .....	13
2.1.6 Método de Elementos Finitos (FEM).....	14
2.1.7 ANSYS Workbench.....	15
2.1.8 Espectro Frecuencial. ....	23
2.1.9 Sistema LTI.....	25
3. METODOLOGÍA.....	25
3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN .....	25

3.2 Hipótesis.....	26
3.3 VARIABLES.....	26
3.3.1 Variables Independientes .....	26
3.3.2 Variables dependientes.....	26
4.1 DESARROLLO INGENIERIL .....	26
4.1 Desarrollo ingenieril y resultados del objetivo.....	26
1. Determinar las características físicas y acústicas del instrumento Quijada de Caballo por método experimental.....	26
4.1.1 Propiedades físicas y acústicas de la quijada de caballo .....	26
4.1.2 Anatomía.....	27
4.1.3 Densidad .....	27
4.1.4 Propiedades elásticas. ....	28
4.1.5 Respuesta al impulso .....	36
4.1.6 Resumen de resultados Objetivo 1 .....	44
2. Determinar las características físicas y acústicas del instrumento Quijada de Caballo por método experimental.....	44
4.2 Desarrollo ingenieril y resultados del objetivo.....	46
2. Desarrollar un análisis por el método de elementos finitos del instrumento Quijada de Caballo. ....	46
4.2.1 Modelamiento.....	46
4.2.2 Simulación.....	48
4.2.3 Resumen de resultados Objetivo 2 .....	55
3. Desarrollar un análisis por el método de elementos finitos del instrumento Quijada de Caballo.....	55
4.3 Desarrollo ingenieril y resultados del objetivo .....	56
3. Analizar y comparar los resultados del análisis por el método de elementos finitos frente al método experimental.....	56
4.3.1 Resumen de resultados Objetivo 3 .....	58

3. Analizar y comparar los resultados del análisis por el método de elementos finitos frente al método experimental.....	58
CONCLUSIONES .....	59
RECOMENDACIONES.....	61
BIBLIOGRAFÍA.....	62
ANEXO .....	65

Figura 1. Maxilar inferior Mandíbula Equina. ....	13
Figura 2. Maxilar inferior Mandíbula Equina vista posterior. ....	13
Figura 3. Esquema del concepto de suma modal donde las fracciones $P_n$ de cada modo contribuyen a la respuesta total del sistema. ....	17
Figura 4. Elementos del módulo Fluid29.....	19
Figura 5. Elementos del módulo Fluid30.....	20
Figura 6. Elementos del módulo Fluid220 .....	21
Figura 7. Comparación entre función lineal y una función de forma cuadrática a una distribución de presión.....	21
Figura 8. Elemento del módulo Fluid221. ....	22
Figura 9. Espectro de una onda cuadrada de amplitud 1 y frecuencia 100 Hz. ....	24
Figura 10 Espectrograma tridimensional en el cual se pone de manifiesto la evolución temporal de cada armónico. ....	25
Figura 11. Modo básico del procedimiento para el método de desplazamiento .....	27
Figura 12. Probetas ensayos de compresión y flexión. ....	29
Figura 13. Probetas ensayos de compresión y flexión, vista lateral. ....	30
Figura 14. Ensayo de Compresión. ....	31
Figura 15. Ensayo de flexión. ....	32
Figura 16.Grafica prueba compresión quijada de caballo Muestra 1.....	33
Figura 17.Grafica prueba de compresión quijada de caballo Muestra 2.....	33
Figura 18.Grafica prueba flexión quijada de caballo muestra 1.....	34
Figura 19.Grafica prueba flexión quijada de caballo muestra 2.....	34
Figura 20. Interior de una muestra de quijada de caballo.....	35
Figura 21. Medición respuesta al impulso.....	37
Figura 22. Espectro acumulativo en 1/3 de banda de octava para muestra de audio de ejecución de la quijada de caballo. ....	37
Figura 23. Waterfall Espectro acumulativo en 1/3 de banda de octava para muestra de audio de ejecución de la quijada de caballo.....	38

Figura 24. Waterfal en 1/3 de banda de octava para muestra de audio de ejecución de la quijada de caballo 10ms,92ms.....	39
Figura 25. Waterfal en 1/3 de banda de octava para muestra de audio de ejecución de la quijada de caballo 10ms,40ms, 92,140.....	39
Figura 26. Waterfal en 1/3 de banda de octava para muestra de audio de ejecución de la quijada de caballo 92ms. ....	40
Figura 27. Espectro acumulativo en 1/3 de banda de octava para muestra de audio de ejecución de la quijada de caballo 10ms,92ms. ....	41
Figura 28. Espectro acumulativo en 1/3 de banda de octava para muestra de audio de ejecución de la quijada de caballo 140ms.....	42
Figura 29. Grafica de frecuencias y amplitud para segmentos de tiempo 10ms,92ms y 140ms.....	42
Figura 30. Modelo Quijada de Caballo modelado a mano. ....	46
Figura 31. Quijada de caballo vista lateral. ....	46
Figura 32. Escaneo 3D Quijada de caballo Software Artec Studio 11. ....	47
Figura 33. Quijada de caballo vista lateral. ....	48
Figura 34. Quijada de caballo modelo escaneo 3D. ....	48
Figura 35. ANSIS selección de modulo Modal.....	49
Figura 36. Ansys Características físicas y elásticas del Material. ....	50
Figura 37. ANSIS proceso de importado. ....	50
Figura 38. Simplificación de caras Modelo Quijada de caballo 3D. ....	51
Figura 39. Enmallado Modelo Quijada de caballo 3D.....	52
Figura 40. Enmallado Modelo Quijada de caballo 3D.....	52
Figura 41. ANSYS resultado simulación frecuencia naturales.....	53
Figura 42. Deformaciones Modales ANSYS. ....	54
Figura 43. Deformaciones Modales vista lateral ANSYS. ....	54
Figura 44. Deformaciones Modales vista superior ANSYS.....	55
Figura 45. Grafica correlación Frecuencias método experimental vs Frecuencias simulación.....	57

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Describe los diferentes elementos disponibles en Ansys para el desarrollo de análisis acústicos.	19
Tabla 2. Describe los diferentes Análisis disponibles para el elemento Fluid29.	20
Tabla 3. Describe los diferentes análisis disponibles para el elemento Fluid30.	21
Tabla 4. Comparación de los diferentes tipos de elementos y sus características.	23
Tabla 5. Módulos elásticos Hueso esponjoso en los ejes x,y,z.	35
Tabla 6. Relación armónica de la fundamental 635hz.	43
Tabla 7. Relación armónica de la fundamental 823hz.	43
Tabla 8. Módulos Elásticos Hueso esponjoso en los ejes x,y,z.	45
Tabla 9. Frecuencia fundamental y armónicos.	45
Tabla 10. Características en su envolvente.	45
Tabla 11. Frecuencias método experimental vs Frecuencias simulación.	56

## INTRODUCCIÓN

La Quijada de caballo es un instrumento ancestral proveniente del Continente Africano, Introducido a América en la época de la colonización y adoptado como instrumento típico en algunos países latinoamericanos. En Colombia, en especial la región caribe, concretamente en el Departamento Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, la Quijada de Caballo cumple un papel importante en el contexto cultural musical, siendo adoptado como instrumento típico de la región.

La presente investigación pretende describir el comportamiento acústico de la Quijada de Caballo, por medio del análisis experimental y modelamiento del instrumento, por el método de elementos finitos, dejando como resultado un modelo que podrá ser utilizado para estudios e investigaciones posteriores, en el campo de la Ingeniería de Sonido y en el estudio de instrumentos musicales.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1 ANTECEDENTES

La Quijada, conocida como Charrasca o Jawbone en inglés, se ha utilizado como instrumento musical por varios siglos en muchas culturas, es un instrumento tradicional de Latino América y del Caribe, sus orígenes se remontan al Continente Africano, de donde fue introducido a América durante la era de la colonización. Tradicionalmente se hace a partir de la quijada de una mula o bien, caballo o burro. Se limpian sus tejidos y se deja secar de manera que los dientes puedan aflojarse y actuar como una especie de sonajero.

En la actualidad no se registran investigaciones cuyo objeto de estudio sea el comportamiento acústico de la Quijada de caballo. No obstante, existen registros de investigaciones del comportamiento acústico de una variedad grande de instrumentos que pueden servir como guía para esta investigación.

Para el desarrollo de esta investigación se tomaron como referencia las siguientes investigaciones y/o artículos:

“Análisis acústico del instrumento de percusión tambor hembra, aplicado a la microfonería del mismo”, por Wilver Joany Viana Manosalva y Adriana Paola Victoria González, de la Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá, como tesis de grado para optar por el título de Ingeniería de Sonido, en el año 2006.

La citada investigación está centrada en el análisis acústico del instrumento tambor hembra por medio del método de elementos finitos modelado con software y por método experimental para determinar los parámetros acústicos del instrumento.

Los parámetros de estudio fueron: concentración de energía, frecuencia fundamental, armónicos, directividad de la fuente y la respuesta al impulso, para así ser aplicado a la microfonería del instrumento.

“Análisis acústico de la gaita colombiana”, por: Luis Ernesto Sarmiento Molina y Gustavo Adolfo Pérez Jiménez, de la Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá, como tesis de grado para optar por el título de Ingeniería de Sonido en el año 2006. En esta ocasión la investigación presenta un análisis de la gaita colombiana por medio de simulación 3D con el método de elementos finitos y el método experimental, patrón polar, respuesta al impulso.

“Análisis modal de la caja de la guitarra acústica variando sus dimensiones”, por: Hermida Cadena Luis Fernando de la Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá, como tesis de grado para optar por el título de Ingeniero de Sonido, en el año 2005. EL objetivo de este trabajo fue analizar la emisión de sonido de las guitarras acústicas al variar sus dimensiones. Se logró determinar las características acústicas de las guitarras por medio del método experimental y el método de elementos finitos. Se utilizó el método de respuesta al impulso de

forma inversa para determinar la respuesta al impulso de los instrumentos, concluyendo que este método es eficaz y entrega excelentes resultados.

“Estudio de la tapa armónica de la guitarra por el método de elementos finitos”, por: Elejab Arrieta y Jesús Santamaría, C. de la Universidad. del País Vasco. Dpto. de Física Aplicada II, 1999.

El estudio se concentró en conocer el comportamiento dinámico de la tapa armónica de la guitarra, con el fin de optimizar los procesos de construcción. Se simularon sus propiedades vibratorias mediante el método de elementos finitos. Los resultados obtenidos con este método se validaron con medidas experimentales de los parámetros modales.

“Análisis acústico de un tiple colombiano por medio de la obtención de la respuesta al impulso con método directo”, por: Laura Vanessa Acero Martínez, Cesar Darío Bustos Ortiz y Luis Fernando Hermida Cadena. Primeras Jornadas Regionales de Acústica AdAA, 2009, 19 y 20 de noviembre 2009, Rosario Argentina.

Este artículo trata de la experimentación del método directo para hallar la respuesta al impulso del tiple colombiano.

El método consistió en la excitación del instrumento en su puente con una fuerza conocida y el campo sonoro generado se capturó con un micrófono de respuesta plana para luego realizar la convolución y obtener la respuesta al impulso.

“Finite element modelling of brass musical instruments”, por: Nicholas Rose y Damien Holloway, Escuela de Ingeniería, Universidad de Tasmania, Hobart, Australia, Proceeding of Acoustic 2012.

Este Artículo presenta el estudio de las propiedades acústica de tres instrumentos musicales similares de la familia de los vientos metálicos, los cuales son trompeta, corneta, y fiscorno. Por el método de elementos finitos y el método experimental, al caracterizar los instrumentos se logró determinar concentración de energía, frecuencia fundamental, armónicos y directividad de la fuente y la respuesta al impulso, concluyendo que los tres instrumentos poseen comportamientos muy similares.

“Simulated Free Field Measurements”, por: Christopher Struck (AES member). Consistente en el desarrollo de técnicas de tiempo selectivo para realizar mediciones de la respuesta de un altavoz en campo abierto sin necesidad de una cámara anecoica mediante todo el rango de frecuencia de audio.

“Modal análisis and finite element modelling of a grand piano soundboard”, por: R. Corradi , P. Fazioli , S. Miccoli y G. Squicciarini, Politécnico de Milano Departamento de Ingeniería Mecánica, Milán Italia. 8ht International Conference on Structural Dynamics EUROLYN 2011.

Investigación que desarrolló el modelamiento del soundboard de un piano por el método de elementos finitos y confrontó los resultados con medidas experimentales. La investigación se concentró en la comparación entre las vibraciones del soundboard antes y después de ser acoplado o pegado a la estructura del piano.

## **1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

¿Por qué la quijada de caballo?

La Quijada de Caballo es empleada como instrumento musical, que dada su naturaleza rudimentaria cuenta con unas características especiales y únicas, las cuales no han sido estudiadas aún.

La problemática nace a la hora de enfrentar el proceso de captura de la Quijada de Caballo como instrumento musical, ya que los ingenieros de grabación no cuentan con bases, ni estudios científicos posteriores que permitan facilitar y optimizar los procesos de captura del mismo. En el proceso de captura de cualquier instrumento es de vital importancia conocer las características físicas y acústicas de éstos, ya que esta información permite al ingeniero tomar las decisiones más acertadas para optimizar el proceso de captura.

Esta investigación pretende responder la siguiente pregunta:

¿Cuál es el comportamiento acústico de la Quijada de Caballo?

## **1.3 JUSTIFICACIÓN**

Ante la muy probable inexistencia de un modelo que proporcione material académico y teórico concerniente a las características físicas y acústicas de la Quijada de Caballo, resulta de especial interés abordar dicha temática, como objeto investigativo.

Además de lo anterior, se toma como eje de esta investigación la Quijada de Caballo por su importancia cultural y folclórica para el Caribe Insular Colombiano, donde se ha constituido en pieza fundamental y de atracción de la música típica de la región, realzando su identidad cultural y aportándole belleza y unicidad.

El análisis y modelamiento de la Quijada de Caballo permitirá conocer el comportamiento acústico del mismo, generando una herramienta que podrá ser usada como base para próximas investigaciones y guía para Ingenieros de Sonido, que afronten procesos de captura de este, como instrumento musical, permitiéndoles proponer técnicas de captura basadas en esta investigación.

## **1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.4.1 Objetivo general**

Realizar análisis acústico y modelamiento del instrumento Quijada de Caballo por el método de elementos finitos.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Determinar las características físicas y acústicas del instrumento Quijada de Caballo por el método experimental.
- Desarrollar un análisis por el método de elementos finitos del instrumento Quijada de Caballo.
- Analizar y comparar los resultados del análisis por el método de elementos finitos frente al método experimental.

## **1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES DEL PROYECTO**

### **1.5.1 Alcances**

Esta investigación tiene como finalidad identificar las características físicas y elementos acústicos del comportamiento de la quijada de caballo como instrumento musical, basado en el método científico y experimental, utilizando técnicas de modelamiento y simulación por el método de elementos finitos y pruebas experimentales.

Los resultados podrán ser utilizados para estudios e investigaciones posteriores en el campo de la Ingeniería de Sonido y en el estudio de instrumentos musicales.

### **1.5.2 Limitaciones**

- No contar con una cámara anecoica para realizar las mediciones pertinentes del instrumento, las mediciones se llevarán a cabo en campo abierto.
- La investigación se limitará a estudiar una sola variedad del instrumento.
- La investigación únicamente se limitará al estudio de un solo sonido de impacto en el instrumento para las pruebas experimentales.

## **2. MARCO DE REFERENCIA**

### **2.1 MARCO TEÓRICO**

#### **2.1.1 Instrumentos Idiófonos**

Idiófono, del griego, significa sonido propio. Según la clasificación de Hornbostel-Sachs es un instrumento musical que produce el sonido primariamente por la vibración del propio cuerpo, sin uso de cuerdas, membranas o columnas de aire. Su cuerpo de madera, metal o en el caso de esta investigación que comprende hueso, siendo duro, pero con la suficiente elasticidad como para mantener un movimiento vibratorio.

La familia de los idiófonos está formada por una diversidad de instrumentos que son bastante diferentes entre sí, aunque todos tienen una característica que los une, el propio cuerpo del instrumento es el que produce el sonido mediante su vibración. La mayor parte de los instrumentos de percusión que no usan membranas para producir el sonido son idiófonos.<sup>1</sup>

#### **2.1.2 La Quijada de Caballo, instrumento idiófono.**

Idiophone, diophone Sacudido, idiophone sonajero, instrumento de percusión.

Este instrumento es creado a partir de la mandíbula de un caballo, mula o burro. Cuando se retira el hueso del cráneo y se limpia completamente, luego se pasa por un proceso de secado donde los dientes se aflojan y cuando es sacudido o golpeado producen un sonido de vibración.

#### **2.1.3 Anatomía de la Quijada de Caballo.**

La Quijada de Caballo tiene una anatomía de forma triangular o de herradura. Se compone de tres partes principales y tres partes secundarias. Las cuales son Rama, Angulo y cuerpo como se muestra en la figura (1). Cóndilo, Procesos corónides y foramen mandibular, ver figura (2). Consta de un juego dentario de seis premolares, seis molares, seis incisivos inferiores y dos caninos.

#### **2.1.4 Propiedades del sonido de la Quijada de Caballo.**

El sonido es producido por los dientes que, al golpear la mandíbula, vibra junto con esta y producen ruido. El hueso de la mandíbula a menudo se adorna con pequeñas campanas para añadir un carácter diferente al sonido.

---

<sup>1</sup> Disponible en Internet: <http://es.wikipedia.org/wiki/Idi%C3%B3fono> (Fecha de revisión marzo 03 2017).

### 2.1.5 Gama.

Ya que la Quijada de Caballo es un instrumento de percusión desafinado, no tiene rango.<sup>2</sup>

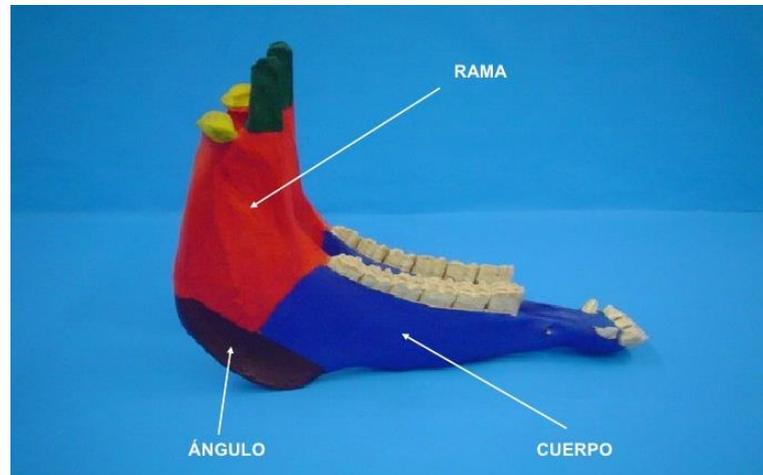


Figura 1. Maxilar inferior Mandíbula Equina.

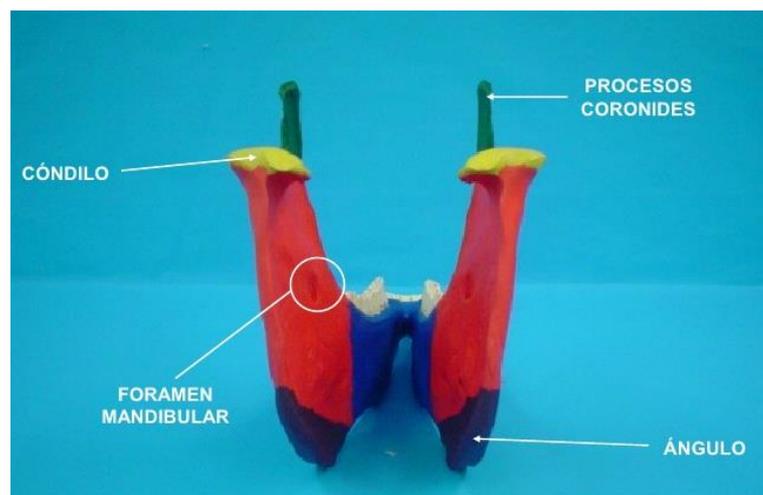


Figura 2. Maxilar inferior Mandíbula Equina vista posterior.<sup>3</sup>

---

<sup>2</sup> Disponible en Internet: <http://dictionary.onmusic.org/terms/1816-jawbone> (Fecha de revisión marzo 03 2017).

<sup>3</sup> Disponible en Internet: <http://es.slideshare.net/AnahiDaidouji/imagenes-de-la-cabeza> (Fecha de revisión marzo 03 2017).

### 2.1.6 Método de Elementos Finitos (FEM)

El método de los elementos finitos es de corte numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales. Este método está pensado para ser utilizado en computadoras, permitiendo resolver ecuaciones diferenciales asociadas a problemas físicos sobre geometrías complicadas.

El método de elementos finitos permite obtener una solución numérica aproximada sobre un cuerpo, estructura o medio continuo, sobre el que están definidas ciertas ecuaciones diferenciales o integrales que caracterizan el comportamiento físico del problema, dividiéndolo en un número de subdominios no-intersectan tes entre sí, denominados elementos finitos. El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también denominada discretización. Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados nodos, el conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se llama malla. Los cálculos se realizan sobre una malla de puntos (llamados nodos), que sirven a su vez de base para la discretización del dominio en elementos finitos.

En el campo de la acústica el método de elementos Finitos tiene numerosas aplicaciones como los son el análisis acústico de interiores, análisis modal de estructuras, radiación sonora, pérdida de transmisión de paneles entre otras aplicaciones. Dicho método posee la capacidad de tener en cuenta el acoplamiento bidireccional entre una estructura y un fluido como puede ser el aire o el agua. En problemas de interacción acústica de estructuras de fluidos deben ser consideradas las ecuaciones de estructuras dinámicas junto con la descripción matemática de la acústica del sistema, dada por las ecuaciones de Navier-Stoker del momento del fluido y de la ecuación de flujo continuo. La ecuación de la dinámica de discretización estructural puede ser formulada usando elementos estructurales finitos. Las ecuaciones de Navier-Stokes son simplificadas para obtener la ecuación de onda acústica asumiendo lo siguiente:

La presión acústica en el medio del fluido se determina por la ecuación de onda descrita en la siguiente formula

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

El fluido es compresible, donde los cambios de densidad se deben a las variaciones de presión.

No hay flujo promedio del fluido.

La densidad y la presión del fluido puede variar a lo largo de los elementos y la presión acústica se define como la presión que excede o supera a la presión promedio.

El análisis por medio de elementos finitos se limita a las presiones acústicas relativamente pequeñas de modo que los cambios en la densidad son pequeñas en comparación con la densidad media.

La ecuación de onda acústica se utiliza para describir la respuesta acústica de un fluido. Cuando la disipación a causa de la viscosidad es despreciada, se denomina a la ecuación como “ecuación de onda sin pérdidas”.

Existen dos métodos de formulación de elementos finitos que se utilizan para analizar los problemas acústicos: El método formulado por presión y el método formulado por desplazamiento. El método formulado por presión es el más utilizado para analizar problemas acústicos.<sup>4</sup>

### **2.1.7 ANSYS Workbench.**

ANSYS es un ecosistema de programas para el diseño, análisis y simulación de objetos, partes o estructuras por el método de elementos finitos. Puede resolver problemas físicos sometidos a esfuerzos térmicos, fluidos, vibraciones y aplicaciones específicas.

En el campo de la acústica ANSYS cuenta con módulos que permiten realizar análisis acústicos y de vibraciones. Para el desarrollo de esta investigación se utilizó el módulo Modal que permite determinar las frecuencias naturales y los modos de vibración.<sup>5</sup>

#### **2.1.7.1 Análisis Modal.**

Se utiliza para calcular las frecuencias naturales y las formas de los modos de los sistemas:

Un análisis modal puede llevarse a cabo para calcular las frecuencias naturales y las formas de los modos de vibración de un sistema acústico o sistema estructural, o un sistema acústico estructural combinado.

Los resultados de un análisis modal realizado en ANSYS se pueden utilizar para calcular la respuesta armónica, transitoria (Transient), o el análisis de espectro de respuesta armónica.

---

<sup>4</sup> **BIES A. David, HANSEN H. COLIN.** Engineering Noise Control. Theory and Practice. Fourth Edition. By Spon Press.London / New York. 2009

<sup>5</sup> **Q. Howard and Benjamin S. Cazzolato.** Acoustic Analyses Using MATLAB® and ANSYS®. by CRC Press, December 18, 2014.

EL análisis modal se lleva a cabo utilizando soluciones simétricas o asimétricas. Las ecuaciones de movimiento para un sistema acústico o estructural pueden ser escritas como (1).

$$(-\omega^2 [M] + j\omega [C] + [K])\{p\} = \{f\},$$

(1)

Donde

[M] es la masa de la matriz.

[C] es el amortiguamiento de la matriz.

[K] es la rigidez de la matriz.

{p} es el vector de las presiones nodales para un Sistema acústico o desplazamiento para un Sistema estructural.

{f} es la carga acústica o estructural aplicada al sistema.

Para un análisis modal básico, se supone que no hay amortiguación y no existen cargas aplicadas, por lo que la matriz de amortiguamiento [C] y el vector de carga {f} se eliminan de la ecuación, dejando la ecuación (2).

$$(-\omega^2 [M] + [K]) \{p\} = \{0\},$$

(2)

Para un sistema (no amortiguado), las oscilaciones de presión libres se supone que son armónicos de la forma (3)

$$\{p\} = \{\varphi\} n \cos \omega n t$$

(3)

{φ} n es el vector propio de las presiones de la frecuencia natural n,

ωn es la frecuencia natural circular natural (radianes / segundos),

(t) es el tiempo.

La sustitución de la ecuación dando como resultado (4)

$$(-\omega^2 n [M] + [K])\{\varphi\} n = \{0\}$$

(4)

La solución trivial es  $\{\phi\}_n = 0$ . La siguiente serie de soluciones es donde el determinante es igual a cero y se escribe como (5)

$$[K] - \omega^2 [M] \quad (5)$$

El cual es un problema estándar de valor propio y se resuelve para hallar las frecuencias naturales (valores propios)  $\omega_n$  y formas de los modos (vectores propios)  $\{\phi\}_n$ .

ANSYS muestra una lista de resultados de las frecuencias naturales  $f_n$  en hercios, en lugar de frecuencia circular en radianes / s, donde  $f_n$  es igual a (6).

$$f_n = \omega_n / 2\pi \quad (6)$$

**El método de suma modal.** Implica el cálculo de las formas de los modos de un sistema estructural o acústico. A esto se le llama factor de participación modal ( $P_n$ ), este contribuye a la respuesta global.

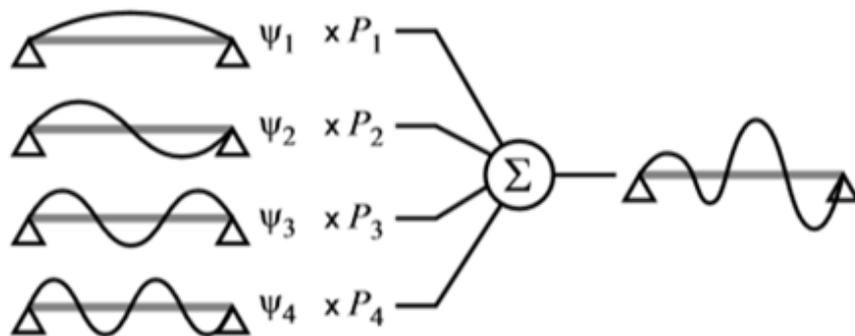


Figura 3. Esquema del concepto de suma modal donde las fracciones  $P_n$  de cada modo contribuyen a la respuesta total del sistema<sup>6</sup>.

<sup>6</sup> Imagen obtenida de : Acoustic Analyses Using MATLAB® and ANSYS® Carl Q. Howard and Benjamin S. Cazzolato. by CRC Press, December 18, 2014.

### 2.1.7.2 Aspectos prácticos de modelado de sistemas acústicos con FEA.

ANSYS brinda una serie de recomendaciones prácticas para el modelo de sistemas acústicos con el método de elementos finitos:

**Longitud de onda.** La longitud de onda acústica en un medio está relacionada con la velocidad del sonido y la frecuencia de excitación por la siguiente ecuación (10).

$$\lambda = c_0 / f \quad (10)$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda acústica,  $c_0$  es la velocidad del sonido en el medio, y  $f$  es la frecuencia de excitación.

Es de vital importancia tener en cuenta la longitud de onda acústica cuando se enmallan los modelos acústicos y estructurales, ya que esto afectará la exactitud de los resultados.

ANSYS propone se utilicen 12 elementos por longitud de onda para elementos lineales (i.e., FLUID29 y FLUID30) y 6 elementos por longitud de onda para elementos cuadráticos (i.e., FLUID220 y FLUID221) ver tabla (4).

**Tipos de elementos.** Hay una serie de tipos de elementos acústicos formulados por presión disponibles en ANSYS para la realización de los análisis acústicos, que se resumen en la Tabla (1). Estos elementos se utilizan para realizar el proceso de enmallado. El método a usar dependerá si las matrices de las ecuaciones de movimiento del sistema son simétricas o asimétricas.

Nombre	2D/3D	Nodos	Descripción
Fluid 29	2D	4	Elemento plano
Fluid 30	3D	8	Elemento ladrillo
Fluid 220	3D	20	Elemento ladrillo
Fluid 221	3D	10	Elemento Tetrahedral

Tabla 1. Describe los diferentes elementos disponibles en ANSYS para el desarrollo de análisis acústicos.

**Fluid 29.** Es un elemento Acústico plano en 2D definido por 4 nodos, sus dos últimos nodos son coincidentes y poseen dos grados de libertad traslacional opcionales a lo largo de los ejes x e y. Este elemento plano 2D solo puede ser

definido por el plano x-y de forma global. El elemento es capaz de modelar la interacción fluido estructura y la amortiguación en la interface de frontera.

Las configuraciones geométricas disponibles para este tipo de elementos son Cuadrilátero y triángulo, como se muestra en la figura (4) y en la tabla (2) se describen los análisis disponibles para este elemento.

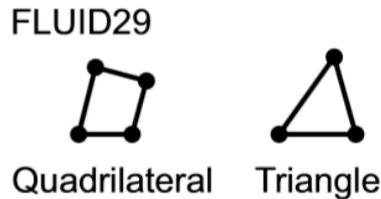


Figura 4. Elementos del módulo Fluid29 <sup>7</sup>.

Tipo de Análisis	Método
Modal	Undamped or Symmetric
Modal	Damped or unsymmetric
Harmonic	Full
Harmonic	Modal summation
Transient	Full
Transient	Modal summation

Tabla 2. Describe los diferentes Análisis disponibles para el elemento Fluid29.

**FLUID30.** Es un elemento lineal 3D de ladrillo definido por 8 nodos, este elemento no tiene nodos en el centro de los lados. Cada nodo tiene un grado de libertad de presión y tres grados de libertad traslacionales opcionales a lo largo de los ejes X, Y, y Z. El elemento es capaz de modelar interacción entre fluidos

<sup>7</sup> Imagen obtenida de Acoustic Analyses Using MATLAB® and ANSYS® Carl Q. Howard and Benjamin S. Cazzolato. by CRC Press, December 18, 2014.

y estructuras y los tres grados de libertad de traslación sólo son aplicables en los nodos en la interfaz FSI.

El anterior tipo de elementos tiene la capacidad de modelar material absorbente dentro de las condiciones de frontera. Las configuraciones geométricas disponibles para este tipo de elementos son hexahedral wedge, pyramid, tetrahedral como se muestra en la figura (5). En la tabla (3) se describen los análisis disponibles para este elemento.

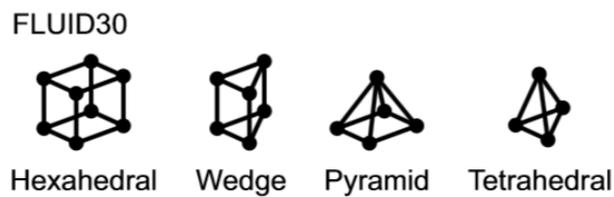


Figura 5. Elementos del módulo Fluid30.

Tipo de Análisis	Método
Modal	Undamped or Symmetric
Modal	Damped or unsymetric
Harmonic	Full
Harmonic	Modal sumation
Trasient	Full
Trasient	Modal sumation

Tabla 3. Describe los diferentes análisis disponibles para el elemento Fluid30.

**FLUID220.** Es una versión de orden superior del tipo de elemento FLUID30 y cuenta con 20 nodos en lugar de 8 nodos. La Figura 4 muestra las posibles configuraciones geométricas. Este elemento posee nodo contralateral, el cual se define por los 20 nodos, y las formas degeneradas de la cuña, pirámide, y tetraédrica se definen por los nodos duplicados en los vértices.

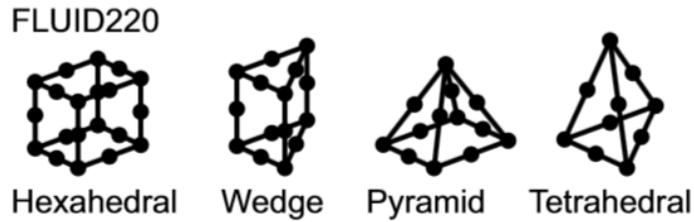


Figura 6. Elementos del módulo Fluid220 <sup>8</sup>.

Las características y capacidades de este elemento son muy similares al elemento FLUID30. Sin embargo, el elemento FLUID30 tiene una función de forma lineal, lo que significa que se supone que la presión varía de forma lineal a través del elemento, mientras que el elemento **FLUID220** tiene una función de forma cuadrática, lo que significa que la presión a través del elemento puede ser descrita por una formulación cuadrática.

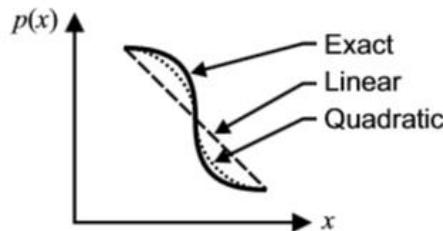


Figura 7. Comparación entre función lineal y una función de forma cuadrática a una distribución de presión<sup>9</sup>.

Si se quisiera utilizar elementos acústicos con funciones de forma lineales, entonces sería recomendable utilizar al menos 4 elementos para modelar esta distribución de la presión.

La función de forma cuadrática requiere un mayor gasto en procesamiento debido a la utilización de un mayor número de nodos, en comparación con la función de elementos lineales.

ANSYS recomienda que al menos 6 elementos por longitud de onda se deban usar para este elemento cuadrático.

---

<sup>8</sup> Imagen obtenida de Acoustic Analyses Using MATLAB® and ANSYS® Carl Q. Howard and Benjamin S. Cazzolato by CRC Press, December 18, 2014.

<sup>9</sup> Imagen obtenida de Acoustic Analyses Using MATLAB® and ANSYS® Carl Q. Howard and Benjamin S. Cazzolato by CRC Press, December 18, 2014.

**FLUID221.** Este elemento es similar al elemento de FLUID220, sin embargo, sólo tiene una configuración geométrica disponible (Tetrahedral); posee 10 nodos, con nodos centrales laterales, como se muestra en la Figura (8).



Figura 8. Elemento del módulo Fluid221<sup>10</sup>.

Las características y capacidades de este elemento son idénticas al elemento de FLUID30. Este elemento tetraédrico es adecuado para su uso cuando hay una geometría complicada y difícil de enmallar con hexaedros. A continuación, se listan y se comparan los diferentes tipos de elementos en la tabla (4).

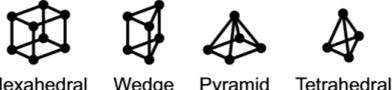
Paquete de elementos	2D/3D	# Nodos	Función	#Elementos x $\lambda$
FLUID29  Quadrilateral Triangle	2D	4	lineal	12
FLUID30  Hexahedral Wedge Pyramid Tetrahedral	3D	8	lineal	12
FLUID220  Hexahedral Wedge Pyramid Tetrahedral	3D	20	cuadrática	6
FLUID221  Tetrahedral	3D	10	cuadrática	6

Tabla (4). Comparación de los diferentes tipos de elementos y sus características.

<sup>10</sup> Imagen obtenida de Acoustic Analyses Using MATLAB® and ANSYS® Carl Q. Howard and Benjamin S. Cazzolato by CRC Press, December 18, 2014.

## Condiciones de frontera o contorno.

En un problema matemático, las condiciones a lo largo de todo el límite deben ser conocidos. Estas condiciones se conocen como las condiciones de contorno y se pueden especificar en tres formas diferentes:

Tipo I: Especificación de la variable primaria (grado de libertad).

Tipo II: Especificación de las variables relacionadas con la derivada de la variable primaria.

Tipo III: Especificación de una combinación lineal de la variable primaria y su derivada.

En un problema estructural, las variables principales son los componentes de desplazamiento. Cuando se utilizan condiciones de frontera de tipo I las restricciones de desplazamiento se especifican a lo largo de un segmento de la frontera. Si se especifican tracciones a lo largo del límite, las condiciones de contorno caen bajo el Tipo II, porque las tracciones están relacionadas con los derivados de los componentes de desplazamiento.

Un caso especial de las condiciones de contorno de tracción es el punto de carga (también llamada la carga de la Fuerza / Momento). Cuando la estructura se somete a tracciones sobre un área más bien pequeña de la frontera, es razonable a idealizar esta condición como una carga concentrada aplicada en un punto. En un problema térmico, la temperatura es la variable primaria, similar a problemas estructurales. Las condiciones de frontera Tipo I corresponden a la especificación de la variable primaria, es decir, la temperatura sobre una parte de la frontera. Condiciones de flujo de calor especificadas caen bajo condiciones de frontera de Tipo II. Por último, las condiciones conectivas corresponden al tipo III.

ANSYS soluciona pos procesando cada una de las condiciones de contorno anteriormente expuestas. Si se aplican sobre las entidades de modelo sólido, ANSYS los transfiere a los nodos cuando se inicia la solución. Aunque las rutas de acceso para la especificación de las condiciones de contorno no se presentan en el procesador de solución, es posible aplicar bajo el preprocesador.<sup>11</sup>

### 2.1.8 Espectro Frecuencial.

Es la representación gráfica de la distribución de amplitudes con sus respectivas frecuencias de un sonido<sup>12</sup>. El espectro en frecuencias está caracterizado por la distribución de amplitudes para cada frecuencia de un fenómeno ondulatorio.

---

<sup>11</sup> **Madenci**, Erdogan, **Guven**, Ibrahim. The Finite Element Method and Aplications in ingeniering Using ANSYS CAPITULO 5 Sección 5.2.

<sup>12</sup> Disponible en Internet: [http://es.wikipedia.org/wiki/Espectro\\_de\\_frecuencias](http://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_de_frecuencias)

Cualquier sonido periódico puede representarse como la suma de una serie de armónicos, es decir de sonidos senoidales cuyas frecuencias son  $f$ ,  $2f$ ,  $3f$ ,  $4f$ ,  $5f$ , etc. Por ejemplo, la central del piano, cuya frecuencia es de 440 Hz, contiene armónicos de frecuencias 440 Hz, 880 Hz, 1320 Hz, 1760 Hz, 2200 Hz, etc. Cada uno de estos armónicos puede tener su propia amplitud. La información sobre las frecuencias que contiene un determinado sonido y sus respectivas amplitudes constituyen lo que se denomina el espectro del sonido.

El espectro se puede especificar en forma de tabla, o se puede representar gráficamente mediante un espectrograma, que es un gráfico con dos ejes: el horizontal, graduado en frecuencia, y el vertical, en amplitud.

En la figura (9), se ha representado el espectrograma para una onda cuadrada de amplitud 1 y frecuencia 100 Hz, incluyendo hasta el armónico 7 <sup>13</sup>.

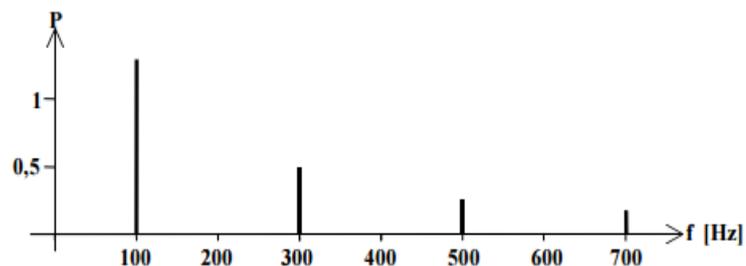


Figura 9. Espectro de una onda cuadrada de amplitud 1 y frecuencia 100 Hz<sup>14</sup>.

Es posible representar gráficamente la variación temporal de cada armónico, como se muestra en la Figura (10), donde se logra visualizar el comportamiento de onda de 100 Hz C con sólo 3 armónicos.

El armónico 1 (100 Hz) se extingue rápidamente, el armónico 2 (200 Hz) se extingue muy lentamente, y el armónico 3 (300 Hz) se extingue moderadamente rápido. Al cabo de algún tiempo, por consiguiente, predomina ampliamente el segundo armónico. Este tipo de análisis son más eficaces para entender el comportamiento de instrumentos musicales.

---

<sup>13</sup> **MIYARA, Federico.** Acústica y Sistemas de Sonido. Capítulos 1 – 5 del libro. Soporte teórico

<sup>14</sup> Imagen obtenida de **MIYARA, Federico.** Acústica y Sistemas de Sonido. Capítulos 1 sección 1.15 del libro. Soporte teórico.

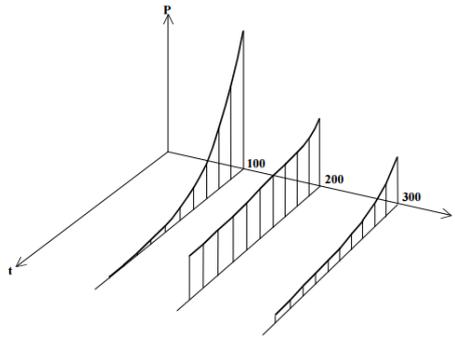


Figura 10 Espectrograma tridimensional en el cual se pone de manifiesto la evolución temporal de cada armónico<sup>15</sup>.

### 2.1.9 Sistema LTI.

Se define como un sistema caracterizado por presentar linealidad en su comportamiento y es invariante en el tiempo. Un sistema es lineal si satisface el principio de superposición que engloba las propiedades de proporcionalidad y de aditividad. Lo anterior significa que, en un sistema lineal, si la entrada es multiplicada por un factor, la salida del sistema también será multiplicada por el mismo factor. Para que dicho sistema cumpla con las propiedades de aditividad, la entrada de ese sistema lineal será el resultado de la suma de dos entradas y la salida será la resultante de la suma de las salidas que producirán cada una de esas entradas individuales. Por ejemplo, la respuesta al impulso de un sistema. Respuesta a impulso o respuesta impulsiva de un sistema es la que presenta en la salida cuando la entrada se introduce un impulso. Con la respuesta al impulso se puede analizar el comportamiento de un sistema con base en la respuesta de cualquier señal, o respuesta al impulso<sup>16</sup>.

## 3. METODOLOGÍA

### 3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

El método de esta investigación es empírico analítico, ya que se realizarán mediciones experimentales y modelamiento por el método de elementos finitos de la Quijada de Caballo. Como resultado se obtendrá un modelo que servirá como guía o medio de consulta para investigaciones o para enfrentar procesos de captura de dicho instrumento.

---

<sup>15</sup> Imagen obtenida de **MIYARA, Federico**. Acústica y Sistemas de Sonido. Capítulos 1 sección 1.15 del libro. Soporte teórico.

<sup>16</sup> Disponible en Internet: [http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_LTI](http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_LTI) (Fecha de revisión marzo 03 2017).

## **3.2 Hipótesis**

Una vez realizado el análisis y modelamiento del instrumento Quijada de Caballo se podrá obtener un acercamiento de su comportamiento y sus características acústicas, como son, mayor concentración de energía, las frecuencias naturales del instrumento, frecuencia fundamental, y su respuesta armónica.

## **3.3 VARIABLES**

### **3.3.1 Variables Independientes**

- Geometría del instrumento.
- Cantidad de elementos en el enmallado para el análisis numérico.
- Tiempo de procesamiento y cálculo.
- Condiciones ambientales de la medición.

### **3.3.2 Variables dependientes**

- Parámetros acústicos.
- Tiempo de procesamiento.

## **4.1 DESARROLLO INGENIERIL**

### **4.1 Desarrollo ingenieril y resultados del objetivo**

1. Determinar las características físicas y acústicas del instrumento Quijada de Caballo por método experimental.

#### **4.1.1 Propiedades físicas y acústicas de la quijada de caballo**

Las propiedades características de la quijada de caballo como instrumento musical son la anatomía, la cantidad de órganos dentarios y densidad ósea.

Dichas características se constituyen como factor importante para la determinación de la sonoridad y la frecuencia de la resonancia del instrumento. Cabe resaltar que dichas propiedades estas ligadas a factores medio ambientales que influyen en el desarrollo del animal, como lo son la nutrición, la actividad a la que se dedicó el animal, el lugar de desarrollo del mismo, entre otras variables.

Con el fin de llevar acabo el análisis por el método de elementos finito es necesario conocer las propiedades elásticas del material de que está compuesto el instrumento, para realizar el análisis en el software Ansys.

**4.1.2 Anatomía.** La Quijada de caballo utilizada en esta investigación tiene las siguientes especificaciones:

Largo: 38 cm

Alto medido desde el cóndilo hasta la base: 19.1cm

Juego Dentario: Seis premolares, seis molares y seis incisivos inferiores

Peso: 1.029.3 gr.

**4.1.3 Densidad.** Debido a la naturaleza de la quijada de caballo es complejo determinar su densidad neta, es por eso que se opta por determinar la densidad por el método gravimétrico, que está basado en el método de Arquímedes para la determinación de densidad de objetos.

El citado método consiste en sumergir completamente un objeto en un líquido conocido, donde el volumen del cuerpo del objeto es igual al volumen de desplazamiento del líquido. De este modo se deriva la ecuación de la densidad de la masa de un líquido y de un sólido.

$$ps = pn \frac{ms}{mfl} \quad (11)$$

En consecuencia, la densidad desconocida de una sustancia sólida se puede determinar a partir de la densidad conocida del líquido por la flotabilidad y dos valores de masa.<sup>17</sup>

$$pfl = ps \cdot \frac{mfl}{ms} \quad \text{O} \quad pfl = \frac{mfl}{v} \quad (12)$$

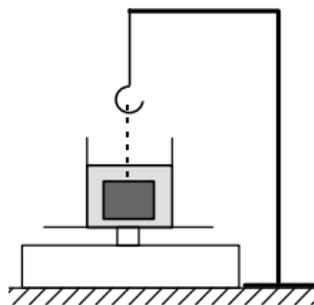


Figura 11. Modo básico del procedimiento para el método de desplazamiento. 17

---

<sup>17</sup> Manual of Weighing Applications part 1 Density. disponible en internet [http://www.dcu.ie/sites/default/files/mechanical\\_engineering/pdfs/manuals/DensityDeterminationManual.pdf](http://www.dcu.ie/sites/default/files/mechanical_engineering/pdfs/manuals/DensityDeterminationManual.pdf) (Fecha de revisión marzo 03 2017).

A continuación, se describe el proceso para la obtención de la densidad.

Elementos empleados

- Báscula digital.
- Probeta.
- Muestra del material o sólido.
- Agua.

Primer paso:

Determinar la masa de la muestra.

Para determinar la masa se pesa la muestra en una báscula digital obteniendo como resultado una masa de 18.1gr.

Una vez completado este paso se procede a determinar el volumen del agua desalojada. Para esto se pesa una probeta con 500 ml de agua y luego se sumerge por completo la muestra en la probeta con agua. La diferencia entre la masa de la probeta con el objeto sumergido menos las masas de la probeta con agua serán igual al volumen de agua desalojada. Una vez obtenido estos datos se procede a resolver la ecuación de densidad.

$$ps = pn \frac{18.1}{17.3} = 1.05 \text{ g/cm}^3 \quad (13)$$

### **Resultados densidad del material**

Como resultado se obtuvo una Densidad de  $1.05 \text{ g/cm}^3$ .

**4.1.4 Propiedades elásticas.** Con el fin de determinar y analizar el comportamiento de la quijada de caballo se realizaron ensayos mecánicos de flexión y compresión. Ya que estas pruebas son de naturaleza destructivas se realizaron estos ensayos en una quijada de dimensiones y anatomía similar al objeto de estudio de esta investigación.

### **Procedimiento**

Los ensayos se llevaron a cabo en el laboratorio de ensayos mecánicos de la Universidad de San Buenaventura, Sede Bogotá. Con una máquina de ensayos de referencia Tinus Olsen H300k.

Como primera aproximación se examina la quijada con el fin de determinar cuántas piezas o probetas pueden ser sacadas para realizar los ensayos.

Se procede acortar la quijada de caballo, extrayendo un total de cuatro probetas, dos para pruebas de compresión y dos para pruebas de flexión. Las dimensiones de las probetas obtenidas fueron:

- Probetas ensayo compresión > 55mm de largo x 45mm de ancho, Espesor 2mm.
- Probeta 1 Ensayo flexión > 200mm de largo x 25mm de ancho, Espesor 23mm.
- Probeta 2 Ensayo flexión > 170mm de largo x 24mm de ancho, Espesor 16mm.



Figura 12. Probetas ensayos de compresión y flexión.



Figura 13. Probetas ensayos de compresión y flexión, vista lateral.

Una vez obtenidas las probetas se procede a realizar las pruebas de compresión. Como primer pasó se colocan los aditamentos necesarios para esta prueba en la máquina. Finalizado esto, se procede a configurar la prueba en el software Test Navigator, donde se determina el tipo de prueba a realizar, tipo de material, dimensión de la probeta, carga a generar y porcentaje de compresión. Una vez configurada la prueba en el software se ubica la probeta en la máquina y se da inicio a la prueba. Esta prueba finaliza de forma automática cuando la pieza llegue al punto de ruptura.

### **Configuración de prueba compresión**

- Tipo de prueba: Compresión.
- Material: Compuesto.
- Dimensión del material: 55mm de largo x 45mm de ancho, espesor 2mm.
- Carga: 100 N x 3mm por minuto.
- Compresión: 90%.

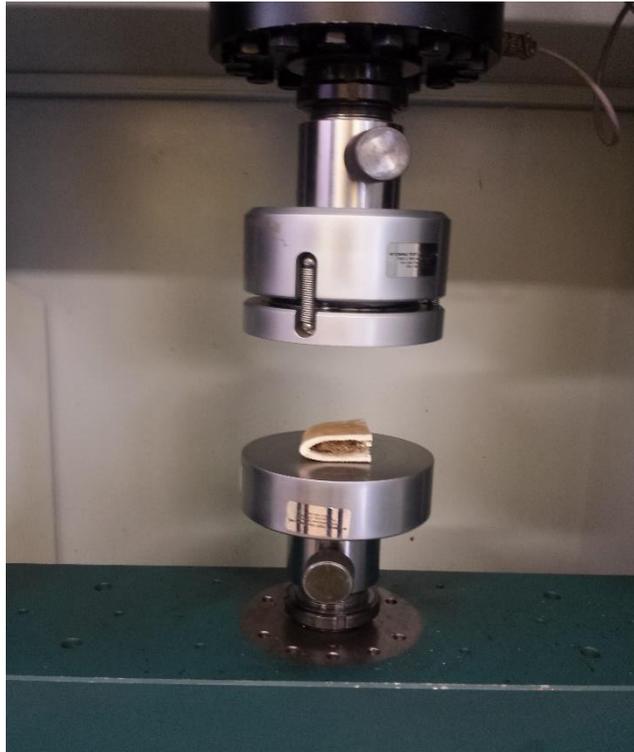


Figura 14. Ensayo de Compresión.

Para el ensayo de flexión se cumple el mismo procedimiento de la prueba de compresión. Se cambian los aditamentos por aditamentos para flexión y se configura la prueba en el software especializado.

#### **Configuración de la prueba flexión**

- Tipo de prueba: flexión.
- Material: Compuesto.
- Dimensión de la probeta: 1: 200mm de largo x 25mm de ancho, Espesor 23mm.
- Dimensión de la probeta: 2:170mm de largo x 24mm de ancho, Espesor 16mm.
- Carga: 100 N x 3mm por minuto.
- flexión: 90%.

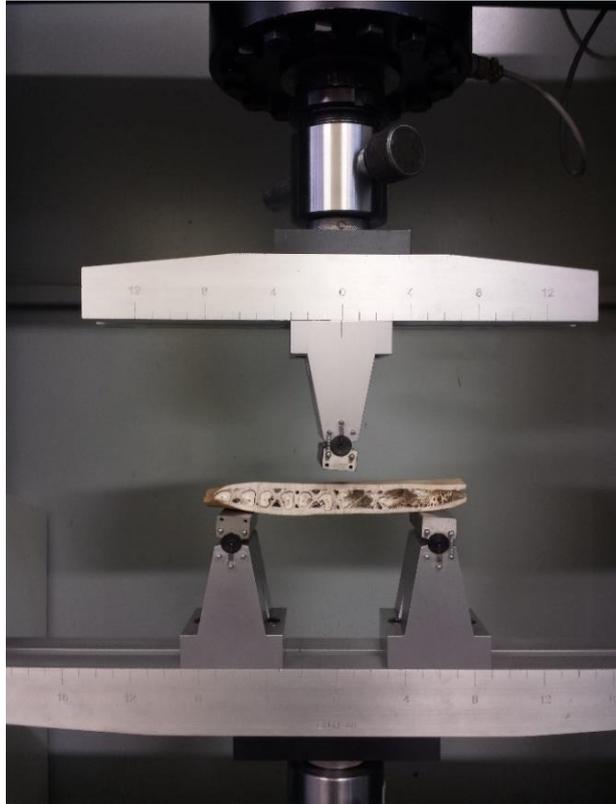


Figura 15. Ensayo de flexión.

### **Resultados propiedades elásticas**

Los resultados obtenidos a partir de las pruebas de compresión y flexión como se muestra en las gráficas de las figuras (17), (18), (19), (20), demuestran poca o ninguna correlación entre los resultados. Para las pruebas de compresión se obtuvieron módulos elásticos con un valor de 3960 MPa y 1665 MPa. Para las pruebas de flexión los módulos elásticos obtenidos fueron de 23.9 MPa y 3.91 MPa. Esta diferencia en los resultados se debe a que la Quijada de Caballo posee una estructura interna tipo esponja no homogénea como se aprecia en la figura (20). dando como resultado módulos elásticos diferentes en cada prueba realizada.

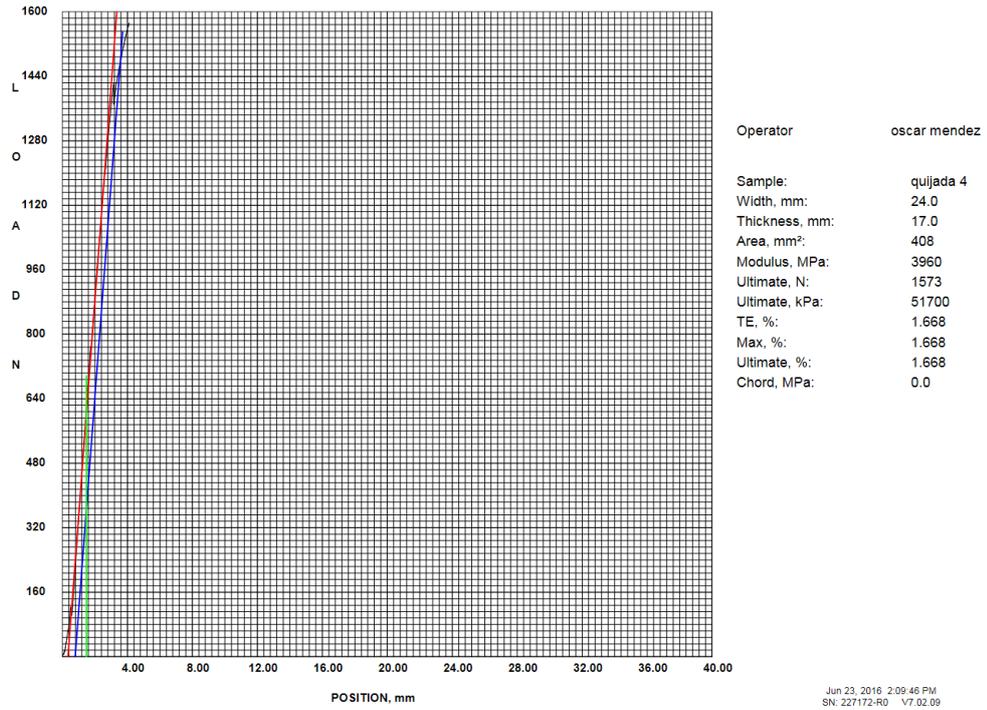


Figura 16. Grafica prueba compresión quijada de caballo Muestra 1.

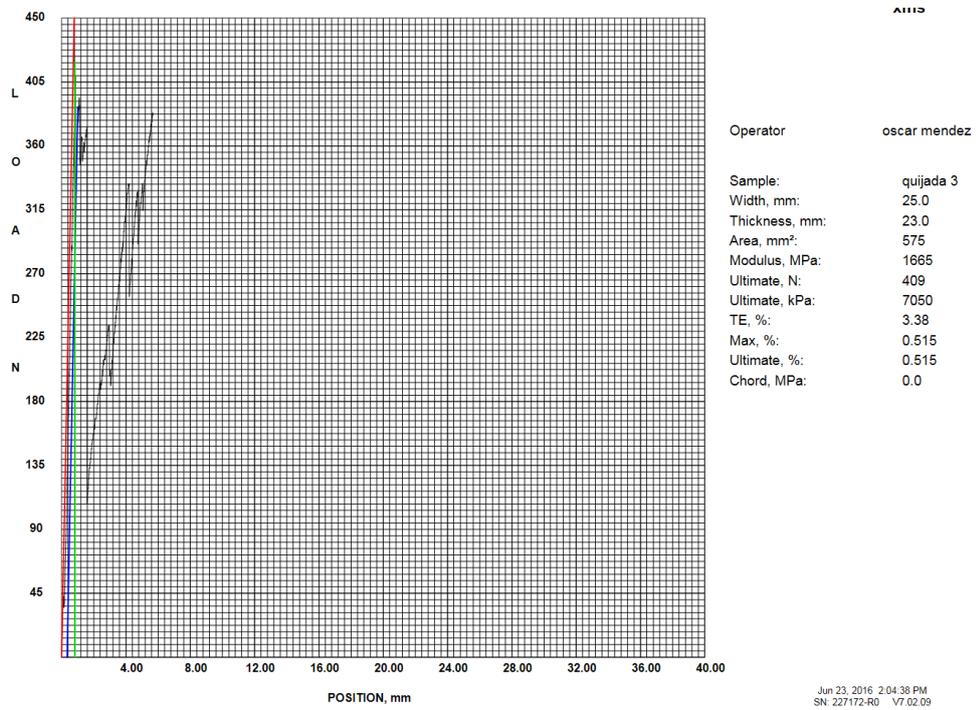


Figura 17. Grafica prueba de compresión quijada de caballo Muestra 2.

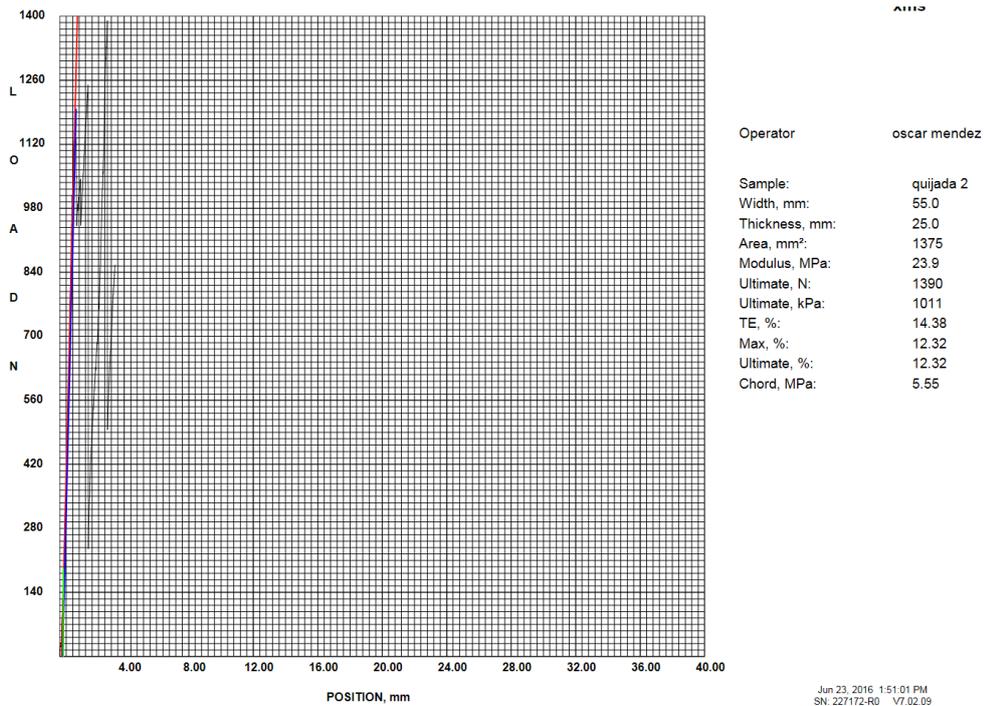


Figura 18. Grafica prueba flexión quijada de caballo muestra 1.

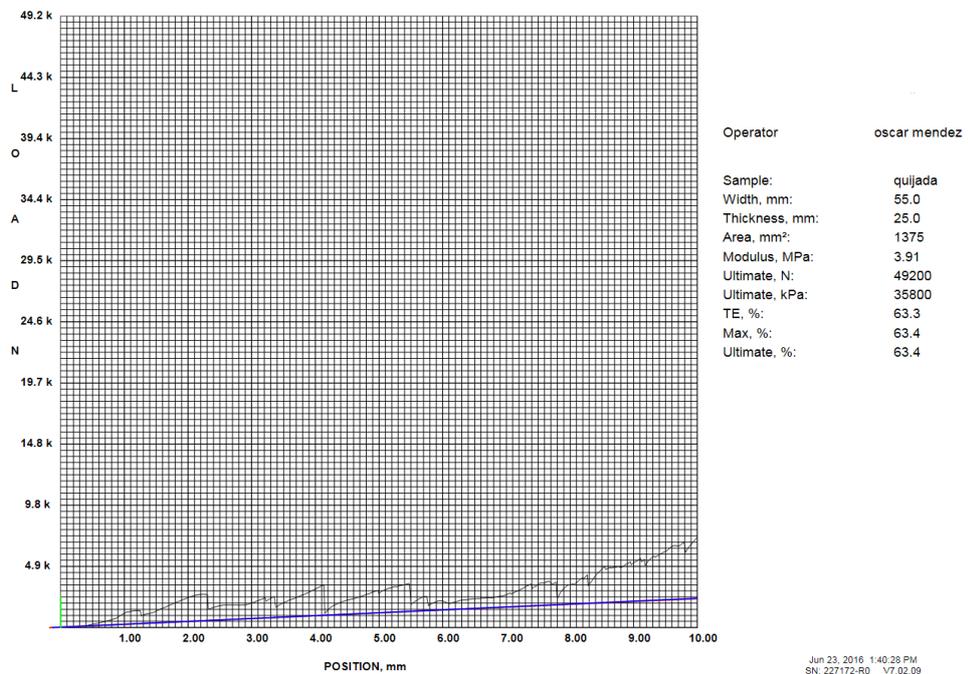


Figura 19. Grafica prueba flexión quijada de caballo muestra 2.

Las gráficas (17), (18), (19), (20) demuestran los diferentes puntos de ruptura al aplicar una fuerza constante. En el eje X se muestra la carga o fuerza aplicada medida (kPa) y en eje Y la posición del material medida en (mm). El punto en el que se intercepta los dos ejes representa el punto de ruptura del material a partir de este valor se obtiene la resistencia elástica del material.



Figura 20. Interior de una muestra de quijada de caballo.

Para obtener un promedio de los módulos elásticos de la quijada de caballo sería necesario realizar pruebas más especializadas y un número alto de ensayos que conllevaría a un mayor costo de investigación, ya que estas pruebas son destructivas. Es por ello que para esta investigación se tomaron de bibliografías los módulos elásticos de hueso esponjoso, que se presentan a continuación en la tabla (5).

Material	Módulo de elasticidad MPa			Coeficiente de Poisson		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Hueso Esponjo	315,650	390,380	942,630	0.295	0.100	0.115

Tabla 5. Módulos elásticos Hueso esponjoso en los ejes x,y,z <sup>18</sup>.

---

<sup>18</sup> Chica E,L.F (2010). **Chica E, Latorre F, Agudelo S.** Prótesis fija: Análisis biomecánico sobre distribución de esfuerzos entre tres alternativas de retención. Rev Fac Odontol Univ Antioq 2010; 21(2): 150-158.

#### 4.1.5 Respuesta al impulso

##### Medición

A continuación, se describe el procedimiento realizado para medir la respuesta al impulso de la Quijada de Caballo.

Elementos empleados:

- Sonómetro SVAN 943A (SVANTEK).
- Trípode para sonómetro.
- Pistó fono.
- Computador portátil.
- Micrófono de medición ECM8000 Beringher.
- Trípode para micrófono.
- Interface de Audio.
- Cables conexionado micrófono interface.
- Software EASERA.
- Sistema de conexionado eléctrico.
- Quijada de Caballo.
- Termómetro.

La medición de respuesta al impulso se lleva a cabo en campo libre, con la finalidad de que esta no se vea afectada por la acción de reflexiones tempranas. La medición se realizó entre 9:00 a.m. y las 12 m, con una temperatura de 19 °C.

Como primer paso se realiza la medición de ruido de fondo, para verificar las condiciones de ruido del espacio donde se lleva a cabo la medición de respuesta al impulso, buscando garantizar que la relación señal ruido sea igual o mayor a 40db. El ruido de fondo promedio fue de 44 dbspl.

Para la medición de respuesta al impulso se limitó a una sola variedad de ejecución del instrumento. La cual consiste en generar un impacto por medio de una baqueta en el área de la rama de la Quijada de Caballo, como se observa en la figura 16.

La Quijada es ubicada a una distancia del suelo de 1.70 cm y a un ángulo similar al de su ejecución. Paso a seguir, se ubica el micrófono de medición a unos 10 cm de distancia en el eje horizontal, buscando una captura lo más limpia y directa posible y se procede a ejecutar el impacto que es capturado y procesado por el software EASERA.

Una vez realizada la captura se procede a procesar la medición en el software EASERA que por medio de la trasformada de furrier nos permitirá obtener la respuesta en frecuencia o espectro acumulativo de forma gráfica.



Figura 21. Medición respuesta al impulso.

### Resultados medición respuesta al impulso

A partir de las figuras obtenidas de respuesta en frecuencia se puede concluir que la Quijada de Caballo presente un comportamiento energético no homogéneo en el tiempo con características en su envolvente de ataque y decaimiento rápido y variaciones de amplitud altas en los primeros segmentos de tiempo entre 0ms a 20ms como se observar en la figura (22).

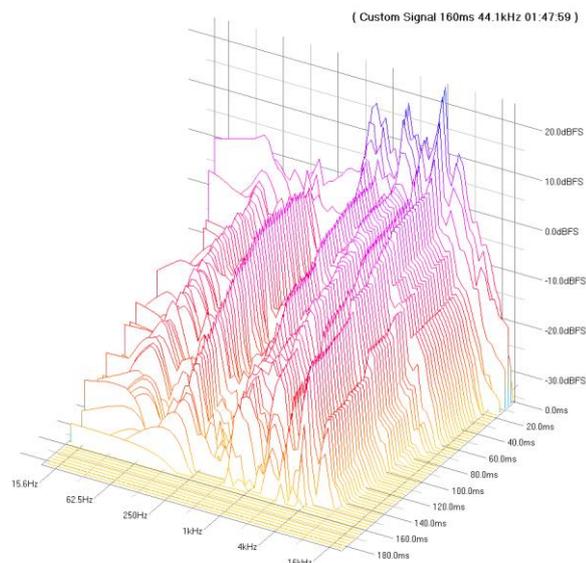


Figura 22. Espectro acumulativo en 1/3 de banda de octava para muestra de audio de ejecución de la quijada de caballo.

En la figura (23), se pueden identificar las frecuencias derivadas del sonido de impacto y su evolución en el tiempo resaltadas en color azul, y su evolución en el tiempo se aprecia en un color violeta. Esto nos permite diferenciar las frecuencias y armónicos propios de la excitación del sistema, de las frecuencias asociadas a ruido de fondo o ambiental. Como resultado de este análisis se descartan las frecuencias por debajo de 100hz para el análisis frecuencial.

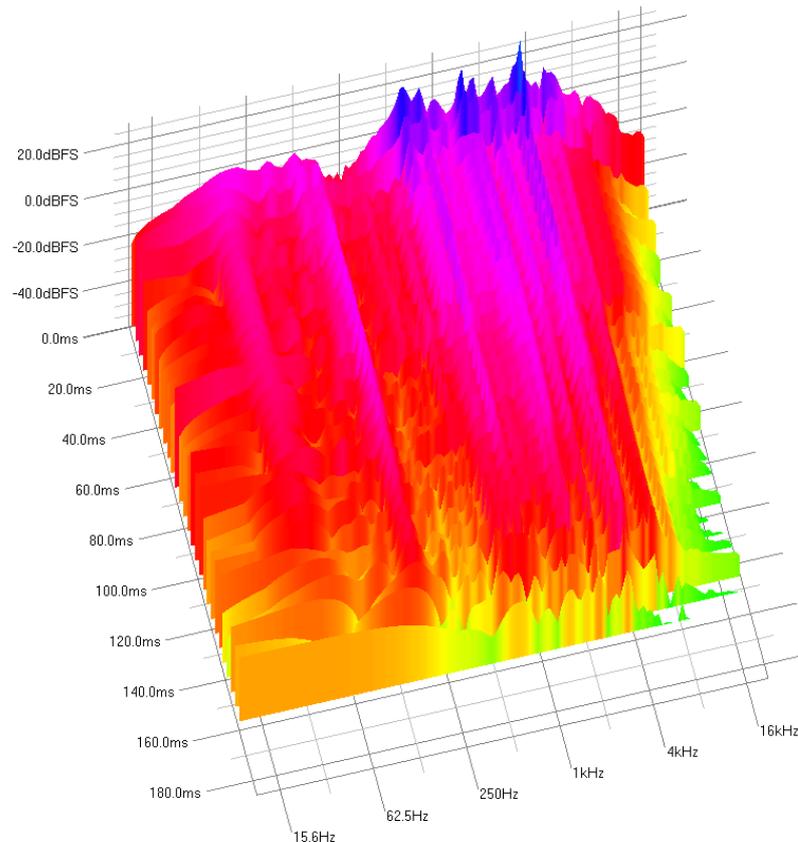


Figura 23. Waterfall Espectro acumulativo en 1/3 de banda de octava para muestra de audio de ejecución de la quijada de caballo.

Para el análisis Frecuencial en el tiempo se toma como punto de partida con respecto a la medición, los segmentos de 10 milisegundos, 92 milisegundos y 140 milisegundos ya que estos lapsos de tiempo Permiten visualizar de mejor manera la evolución de las frecuencias excitadas a lo largo del tiempo como se muestra en las figuras (24), (25), (26).

Se descartan los lapsos de tiempo de medición de 0 a 10 milisegundos ya que el espectro en frecuencia se encuentra totalmente excitado y no permite realizar un análisis e interpretación correcta de los resultados como se observa en la figura (22).

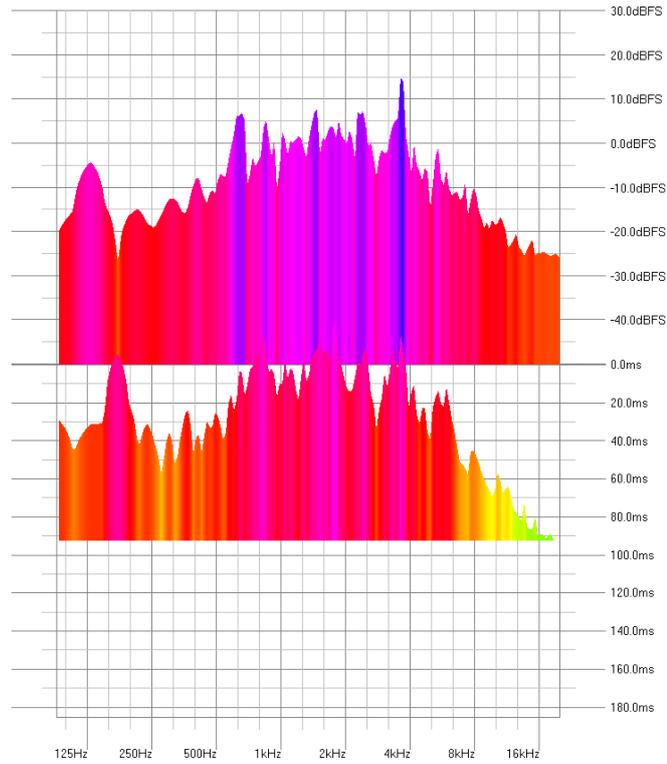


Figura 24. Waterfal en 1/3 de banda de octava para muestra de audio de ejecución de la quijada de caballo 10ms,92ms.

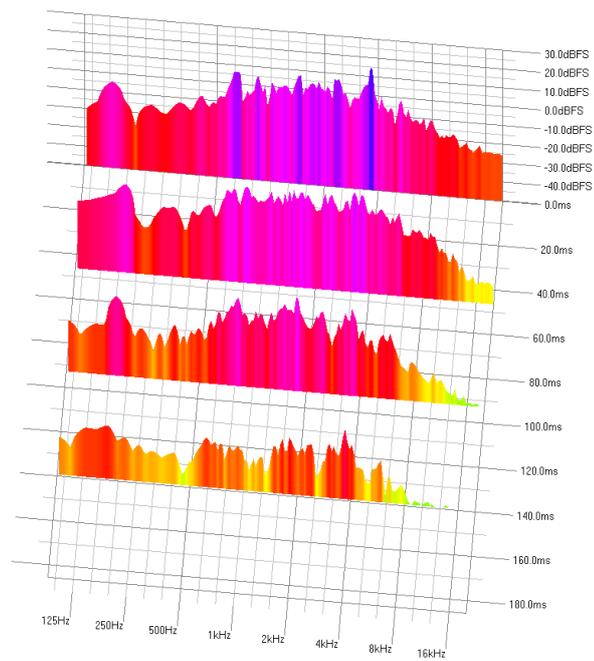


Figura 25. Waterfal en 1/3 de banda de octava para muestra de audio de ejecución de la quijada de caballo 10ms,40ms, 92,140.

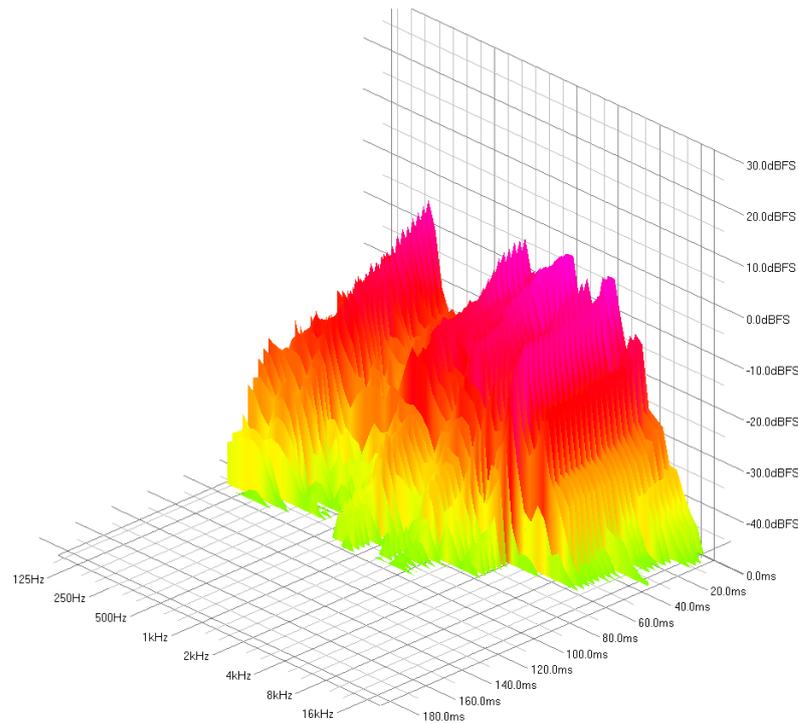


Figura 26. Waterfal en 1/3 de banda de octava para muestra de audio de ejecución de la quijada de caballo 92ms.

De acuerdo con las gráficas para segmentos de tiempo de 10ms, 92ms (véase figura 27) y 140ms (véase figura 28). Se observa que la mayor representación energética se encuentra entre las frecuencias 500hz y 6khz. Con un decaimiento en amplitud considerable entre los segmentos de tiempo 0ms a 10ms siendo estas variaciones de amplitud constantes en el tiempo. Se logran identificar dos frecuencias fundamentales 635hz y 823hz. A partir de estas frecuencias se logra establecer una relación armónica entre las frecuencias 1khz, 1.6khz, 1.8khz, 2.3khz, 3.2khz, 3.6khz, 4.1khz, 5.4khz, 5.9khz, 8khz y las fundamentales, como se observa en la tabla (6), (7), donde se correlacionan la serie armónica matemática para las frecuencias 635hz y 823hz con las frecuencias obtenidas de la respuesta al impulso.

La diferencia promedio entre la serie armónica matemática y las frecuencias medidas para la fundamental 635hz es de 202.85hz. Siendo la frecuencia con menor diferencia 3.2khz con una diferencia de 25hz, y la frecuencia con mayor diferencia 5.4khz con una diferencia de 315hz. Para la fundamental 823hz la diferencia promedio es de 228hz, siendo la frecuencia con menor diferencia 4.1khz con una diferencia de 15hz y la frecuencia con mayor diferencia 5.9khz con una diferencia de 684hz ver tabla (6), (7). Estas frecuencias presentan un comportamiento en su envolvente de ataque y decaimiento rápido, con un punto de máxima amplitud en la frecuencia 3.6khz a 25.8dbfs para el segmento de tiempo de 10ms. Se desatanan frecuencias enarmónicas en 172hz, 1.4khz. Para el segmento de tiempo de 92ms (véase figura 27) se puede observar el rápido decaimiento de la frecuencia 3.6khz a -3.7dbfs siendo desplazada como punto máximo de amplitud por la frecuencia de 1.8 kHz con amplitud de -0.7dbfs.

También se registra un decrecimiento considerable en amplitud para frecuencias a partir de 8kHz y por debajo de 635hz. Se observa en el segmento de tiempo de 140ms (véase figura 28) que el patrón de decaimiento es constante y las amplitudes en las frecuencias se evidencia más promediadas siendo la frecuencia la de máxima amplitud 3.6kHz con **-7.2dbfs**.

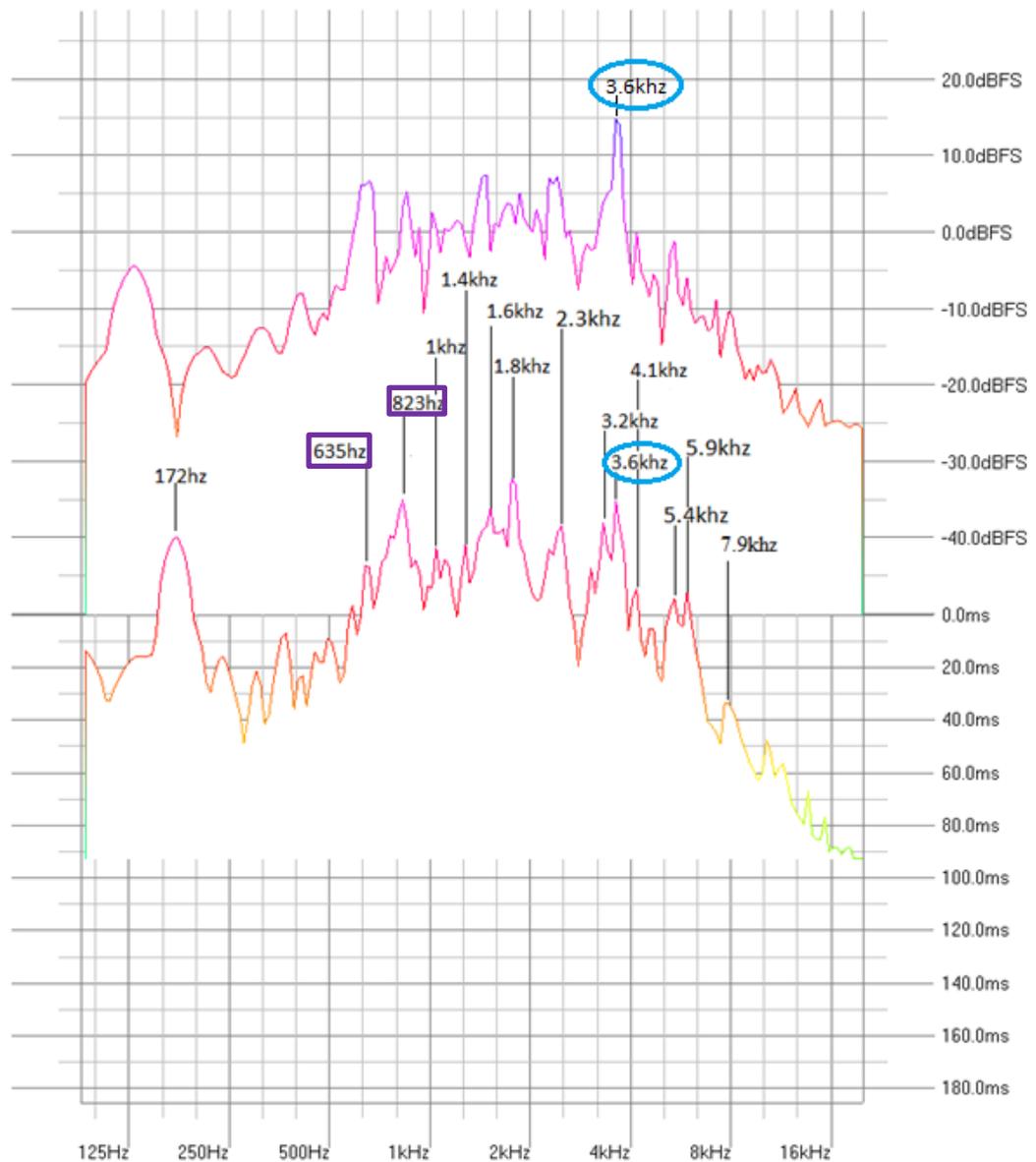


Figura 27. Espectro acumulativo en 1/3 de banda de octava para muestra de audio de ejecución de la quijada de caballo 10ms,92ms.

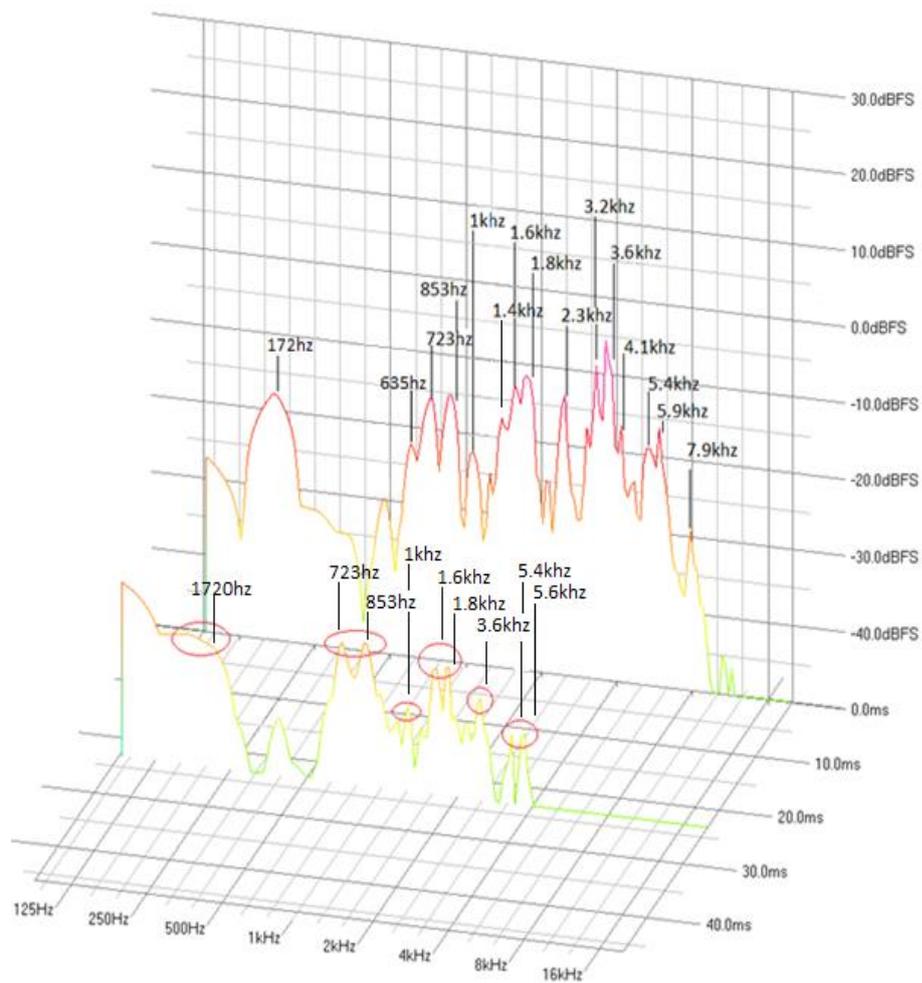


Figura 28. Espectro acumulado en 1/3 de banda de octava para muestra de audio de ejecución de la quijada de caballo 140ms

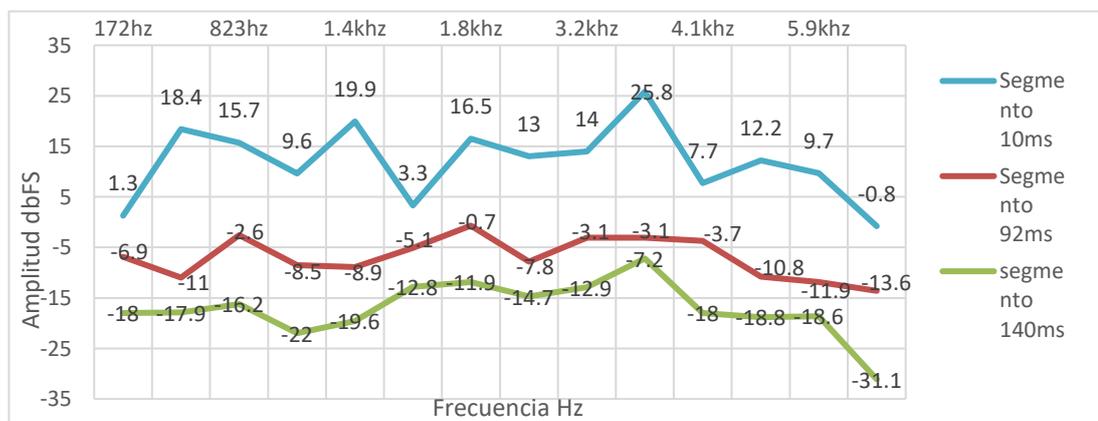


Figura 29. Grafica de frecuencias y amplitud para segmentos de tiempo 10ms,92ms y 140ms.

Armónico	Armónicos	Frecuencia	Rango de error	Intervalo
Fundamental	635 Hz	635hz	0hz	tono
1 ° armónico	1270hz	1000hz	270hz	octava
2º armónico	1905Hz	1.800hz	105hz	quinta
3º armónico	2540Hz	2.300hz	240hz	octava
4º armónico	3175Hz	3200hz	25hz	tercera mayor
5º armónico	3810Hz	3600hz	210hz	quinta
8º armónico	5715Hz	5400hz	315hz	segunda mayor
12º armónico	8255 Hz	8000hz	255hz	sexta mayor

Tabla 6. Relación armónica de la fundamental 635hz.

Armónico	Armónicos	Frecuencia	Rango de error	Intervalo
Fundamental	823hz	823hz	0	tono
1º armónico	1646Hz	1600hz	46hz	octava
2º armónico	2469Hz	2300hz	169hz	quinta
3º armónico	3292Hz	3200hz	92hz	octava
4º armónico	4115Hz	4100hz	15hz	tercera mayor
6º armónico	5761Hz	5400hz	361hz	séptima menor
7º armónico	6584Hz	5900hz	684hz	octava
9º armónico	8230Hz	8000hz	230hz	tercera mayor

Tabla 7. Relación armónica de la fundamental 823hz.

A partir del análisis anterior se concluye que.

- La Quijada de Caballo presente un comportamiento energético no homogéneo en el tiempo.
- Posee características en su envolvente de ataque y decaimiento rápido con relajación prolongada.
- Sus variaciones de amplitud son altas en los primeros segmentos de tiempo entre 0ms a 20ms.
- La mayor representación energética se encuentra entre 500hz y 6khz.
- Cuenta con frecuencias fundamentales en 635hz y 823hz con una serie armónica para 635hz en las frecuencias (1khz,1.8khz,2.3khz,3.2khz,3.6khz,5.4khz,8khz) y serie armónica para 823hz en las frecuencias (1.6khz,2.3khz,3.2khz,4.1khz,5.9khz,8khz).
- La diferencia promedio entre la serie armónica matemática y las frecuencias medidas es de 215hz.
- La frecuencia con menor diferencia para la fundamental 635hz es 3.2khz con una diferencia de 25hz, y la frecuencia con mayor diferencia es 5.4khz con una diferencia de 315hz.
- La frecuencia con menor diferencia para la fundamental 823hz es 4.1khz con una diferencia de 15hz y la frecuencia con mayor diferencia es 5.9khz con una diferencia de 684hz.

#### **4.1.6 Resumen de resultados Objetivo 1**

2.Determinar las características físicas y acústicas del instrumento Quijada de Caballo por método experimental.

#### **Anatomía**

Largo 38 cm. Alto medido desde el cóndilo hasta la base: 19.1cm

Juego Dentario: Seis premolares, seis molares y seis incisivos inferiores

Peso: 1.029.3 gr.

**Densidad del material.**

1.05 g/cm<sup>3</sup>

**Módulos Elásticos.**

Material	Módulo de elasticidad MPa			Coeficiente de Poisson		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Hueso Esponjo	315,650	390,380	942,630	0.295	0.100	0.115

Tabla 8.

**Frecuencia fundamental y armónicos.**

Fundamental	Armónicos						
635hz	1khz	1.8khz	2.3khz	3.2khz	3.6khz	5.4khz	8khz
823hz	1.6khz	2.3khz	3.2khz	4.1khz	5.9khz	8khz	

Tabla 9.

**Características en su envolvente**

Envolvente	Tiempo
Ataque	0ms
Decaimiento	158ms

Tabla 10.

## 4.2 Desarrollo ingenieril y resultados del objetivo

2. Desarrollar un análisis por el método de elementos finitos del instrumento Quijada de Caballo.

### 4.2.1 Modelamiento

**Modelado.** La quijada de caballo por ser un instrumento de naturaleza orgánica presenta un grado de dificultad alto a la hora de ser modelado. Como primera aproximación se modeló la Quijada de Caballo en el software SolidWorks utilizando técnicas tradicionales de modelado 3D, como se observa en la figura (30).

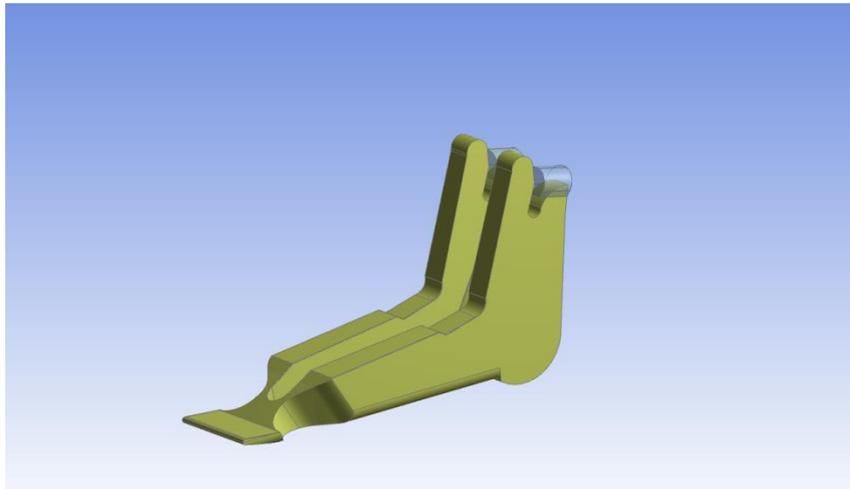


Figura 30. Modelo Quijada de Caballo modelado a mano.



Figura 31. Quijada de caballo vista lateral.

El modelo obtenido utilizando estas técnicas no fue el más acertado a la hora de representar de forma correcta al instrumento, ver figura (30) y (31). Debido a esto se optó por utilizar técnicas de modelado por escaneo 3D. A continuación, se describe el proceso de modelado por escaneo 3D.

El proceso de escaneo 3D se llevó a cabo por la empresa PROTOTYPE 3D en la ciudad de Bogotá Colombia.

Elementos utilizados:

- Escáner Artec Eva.
- Software Artec Studio 11.

Como primer paso se acopla la quijada de caballo a un soporte que permite evitar el contacto con otras superficies. Seguido a esto se hace un barrido del objeto en su totalidad por medio del escáner Artec Eva, una vez terminado este proceso el software Artec Studio 11 se encarga de renderizar cada una de las caras escaneadas.

Como resultado se logró obtener un modelo 3D de gran resolución y representación casi idéntica del instrumento, como se observa en la figura (32), (33) y (34).

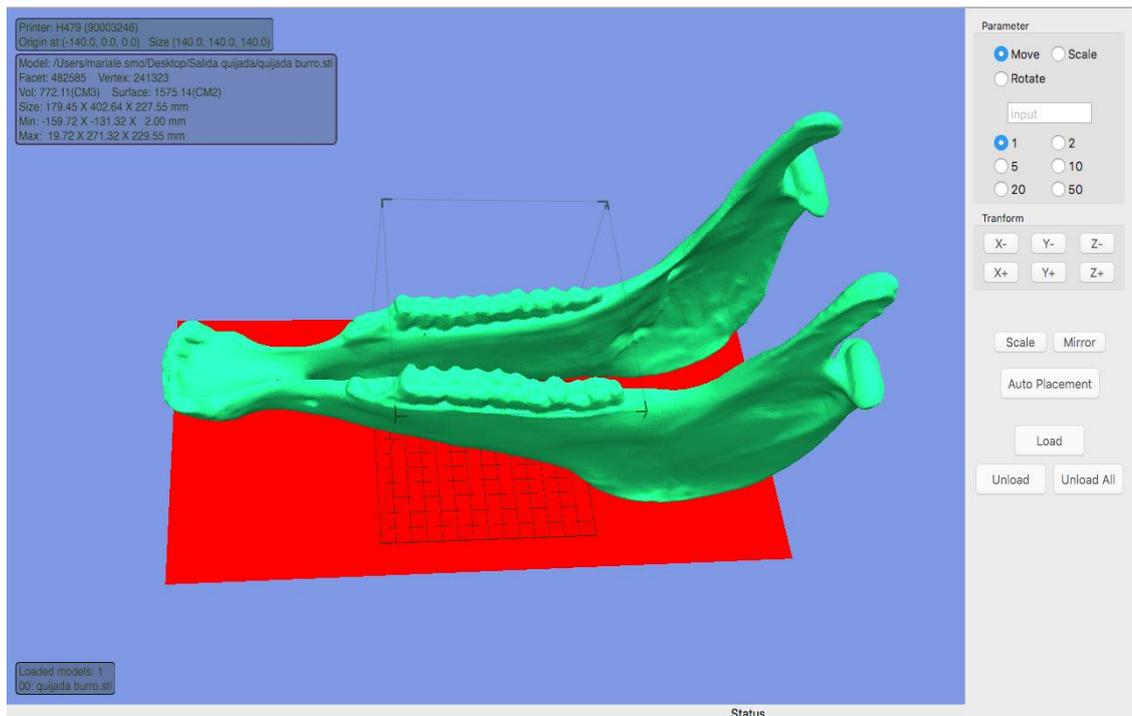


Figura 32. Escaneo 3D Quijada de caballo Software Artec Studio 11.



Figura 33. Quijada de caballo vista lateral.

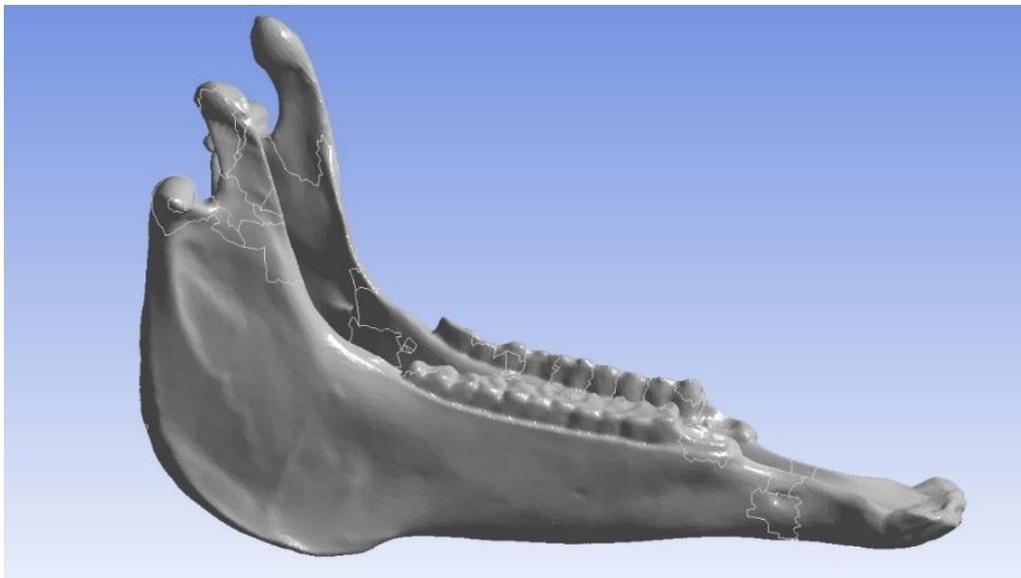


Figura 34. Quijada de caballo modelo escaneo 3D.

El modelo se exportó en formato IGES para su futura importación al software de análisis ANSYS WORKBENCH.

#### 4.2.2 Simulación

**Simulación.** El proceso de simulación consiste en una serie de tres pasos: Pre procesamiento, Solucionador y Pos procesamiento.

A continuación, se describe cada paso del proceso de simulación.

## Pre procesamiento

### 1. Selección de Modulo.

Se selecciona el módulo Modal, el cual permite obtener las frecuencias naturales y deformaciones modales de un objeto ver figura (35).

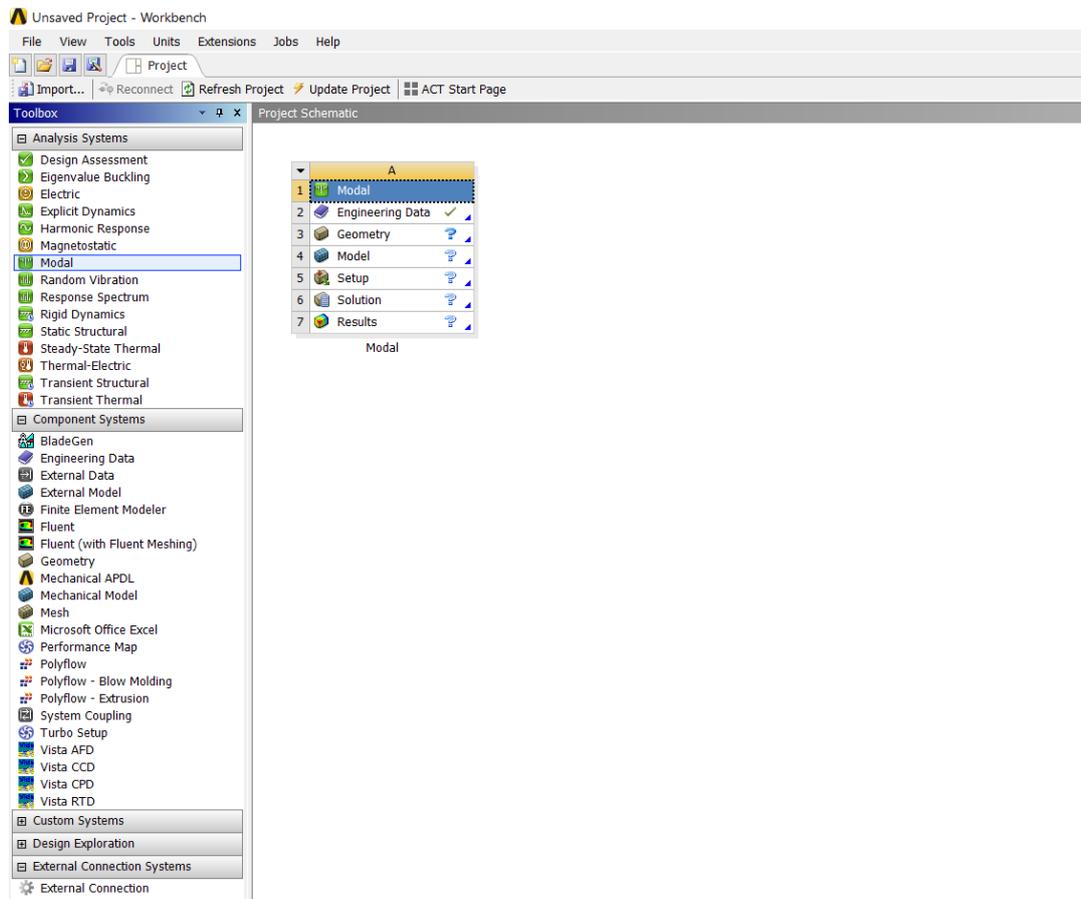


Figura 35. ANSYS selección de modulo Modal.

### 2. Se definen las características físicas del Modelo 3D.

En el módulo previamente seleccionado se ingresa en la sección Engineering Data, ver figura (35). La cual nos permite definir las características físicas y elásticas del modelo 3D. Una vez seleccionada esta sección, se selecciona la opción Density, para la densidad del material y Orthotropic para los módulos elásticos, paso a seguir se ingresan los valores de los módulos de elasticidad y densidad del material, ver figura (36).

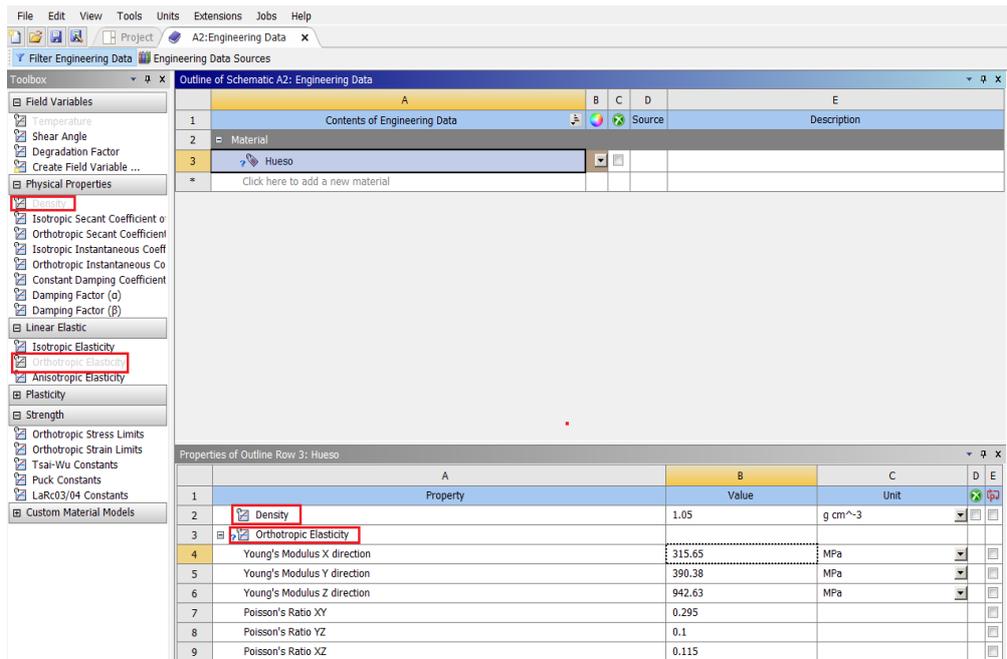


Figura 36. ANSYS Características físicas y elásticas del Material.

### 3. Modelo 3D

Se Importa el modelo 3D creado previamente a ANSYS, en la sección Geometry, ver figura (37). una vez importada la geometría se procede a crear el enmallado en la sección Model.

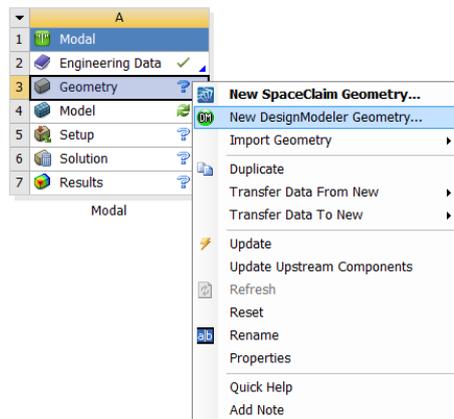


Figura 37. ANSYS proceso de importado.

#### 4. Enmallado

ANSIS ofrece una serie de opciones para la creación del enmallado, que va desde un enmallado automático hasta un enmallado de selección manual. Después de una serie de pruebas se pudo determinar que la técnica de enmallado más apropiada para este tipo de geometrías consiste en hacer una simplificación del número de caras de la geometría con la herramienta topología virtual, ver figura (38).

Una vez realizada la simplificación de caras se selecciona el método patch independiente para crear el enmallado, este método permite enmallar la parte interna de la estructura de forma independiente al enmallado exterior. Se utilizaron elementos tetraedros ya que estos elementos tienen como característica una mayor adaptabilidad a las geometrías complejas y requiere un número menor de elementos por longitud de onda, ver tabla (34) pág. (30).

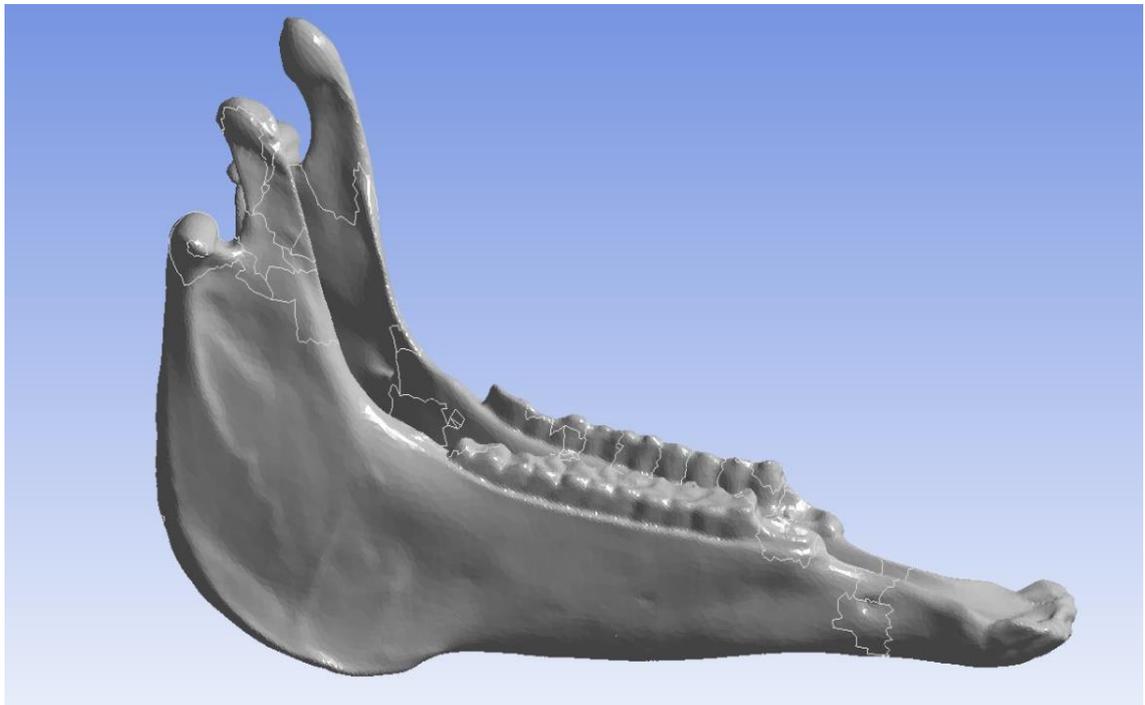


Figura 38. Simplificación de caras Modelo Quijada de caballo 3D.

Como resultado se obtuvo un enmallado conformado por 27536 elementos y 31608 nodos con elementos tetraedros. Logrando enmallar la totalidad de la geometría de forma homogénea, como se observa en las figuras (39), (40).

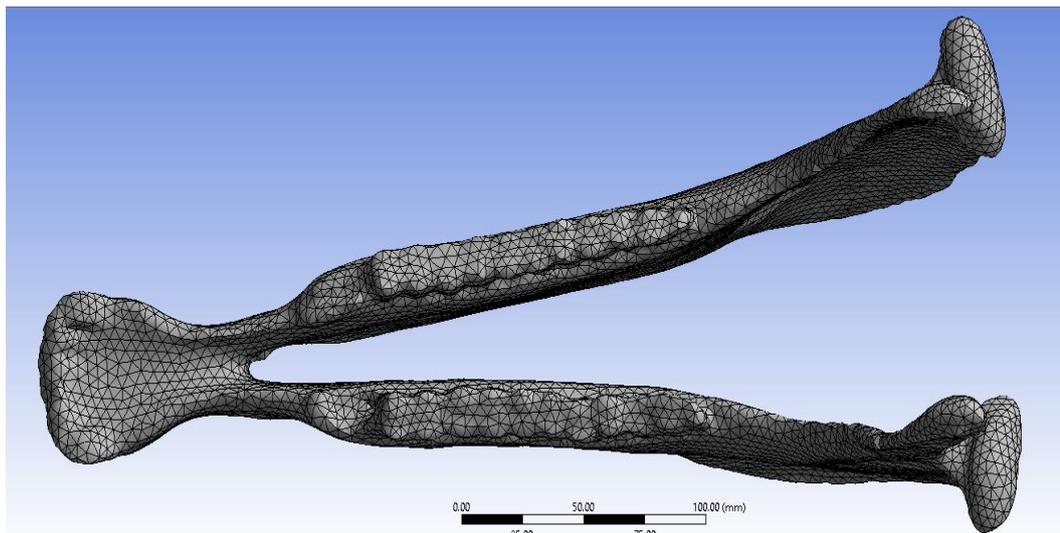


Figura 39.Enmallado Modelo Quijada de caballo 3D.

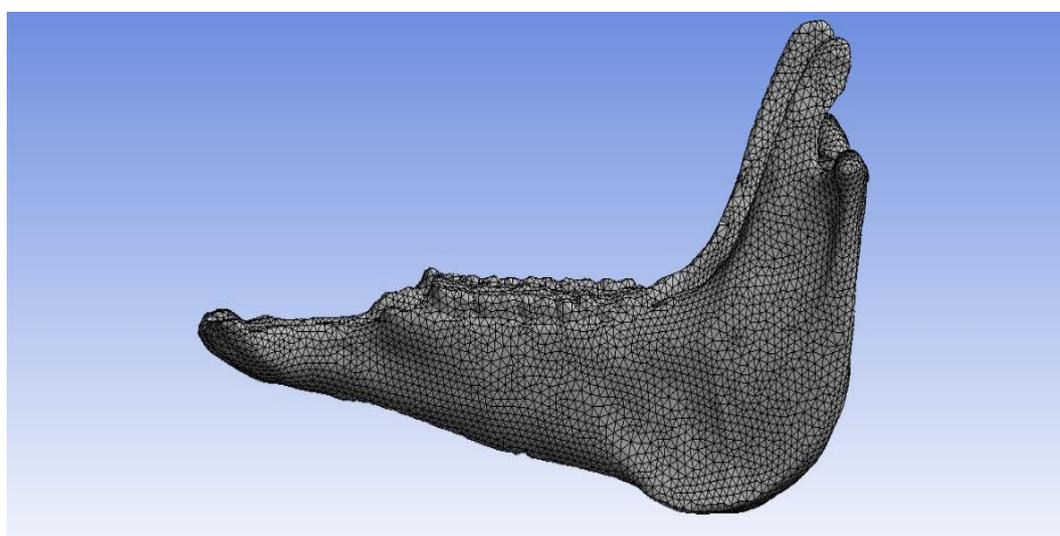


Figura 40.Enmallado Modelo Quijada de caballo 3D.

### **Solucionador**

Una vez enmallada la geometría se procede a darle solución a la simulación la cual dará como resultado las deformaciones modales y sus frecuencias. Los resultados de la simulación se muestran en la sección Result, obteniendo una tabla con las frecuencias naturales de la Quijada de Caballo, ver figura (41). Estos datos se listan de manera precisa en la tabla número (2) sección anexo.

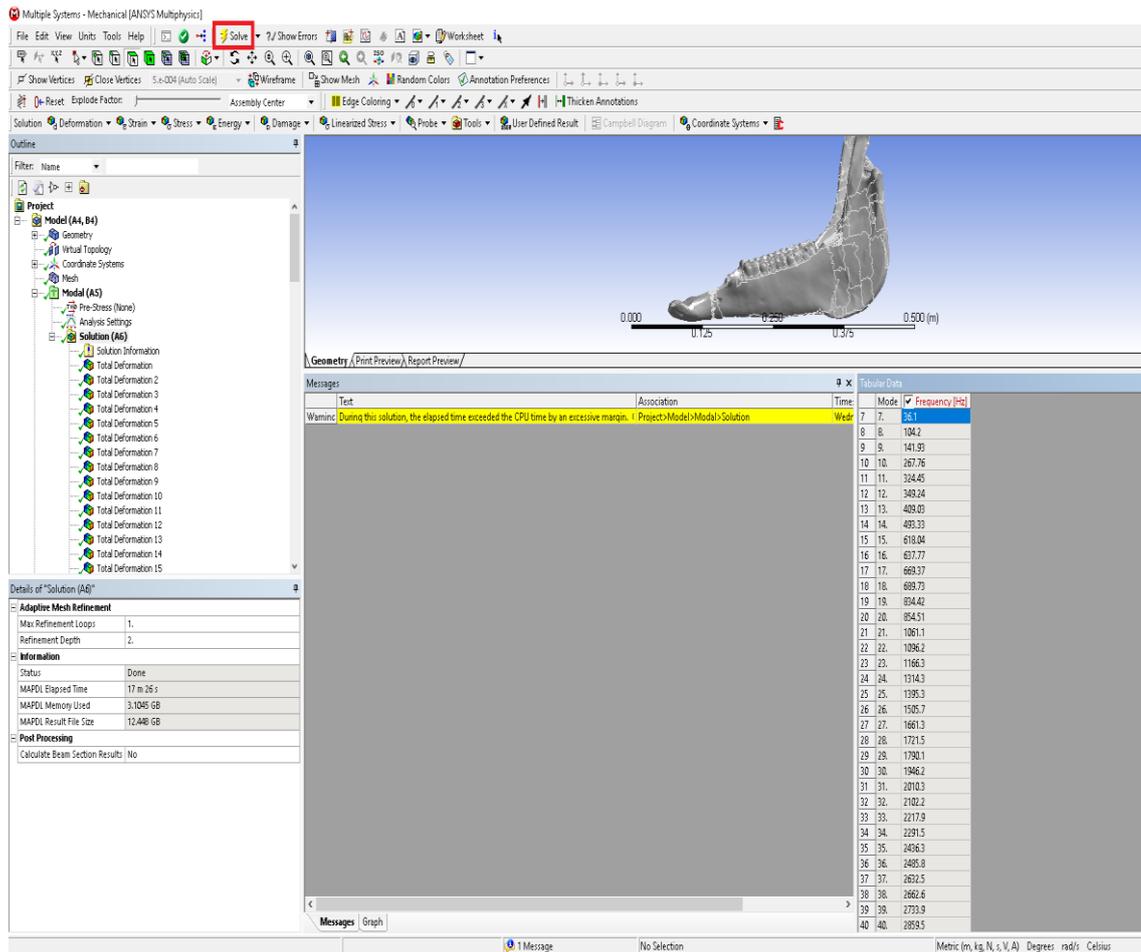


Figura 41. ANSYS resultado simulación frecuencia naturales.

### Pos procesamiento.

Una vez obtenidas las frecuencias naturales del instrumento se procede a generar las deformaciones modales. A continuación, se describe el procedimiento:

- Se seleccionan las frecuencias de las cuales se quieren obtener los modos de deformación.
- Se selecciona la opción create mode shape result por medio del comando clic derecho sobre la tabla de frecuencias.
- Como resultado se obtuvo la deformación modal total del sistema. Ver figuras (42), (43), (44).

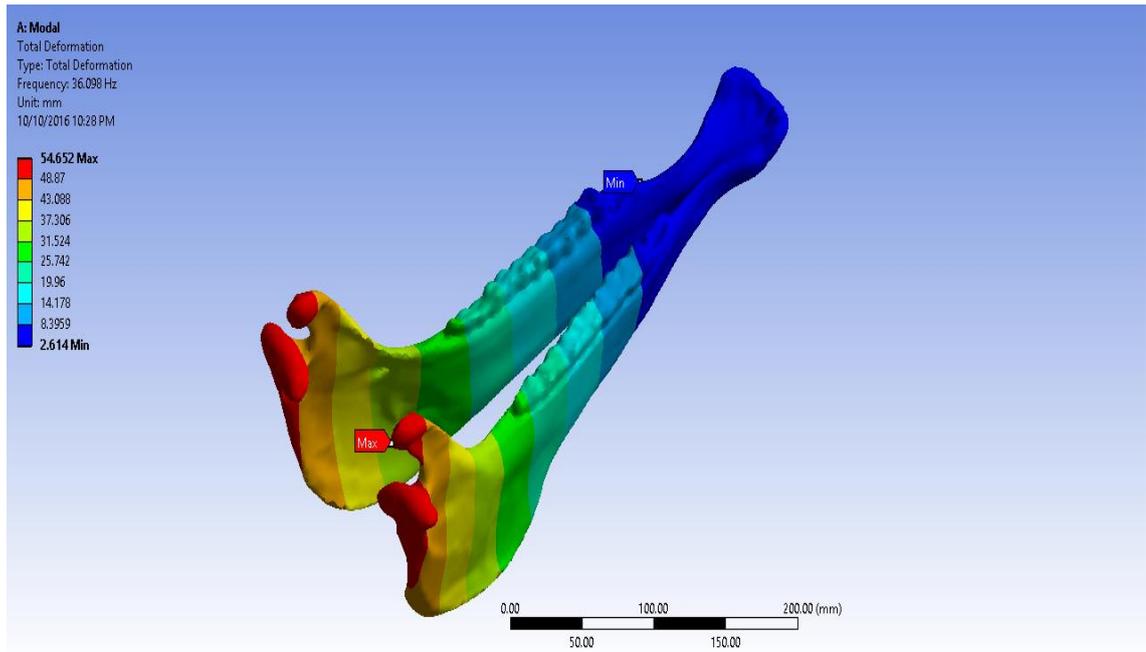


Figura 42. Deformaciones Modales ANSYS.

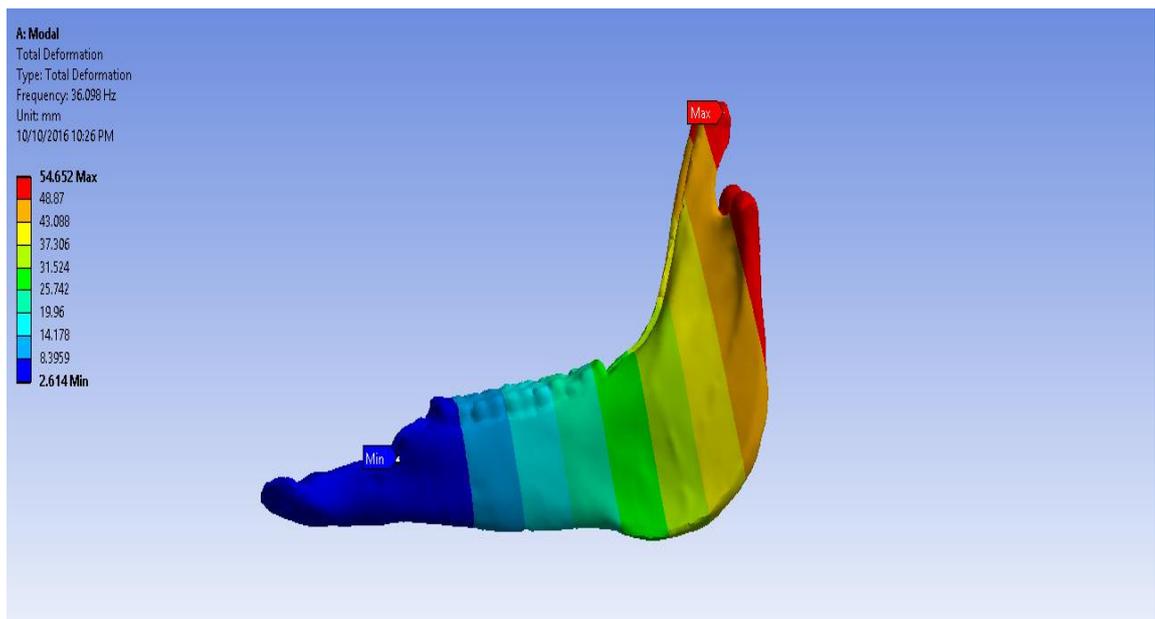


Figura 43. Deformaciones Modales vista lateral ANSYS.

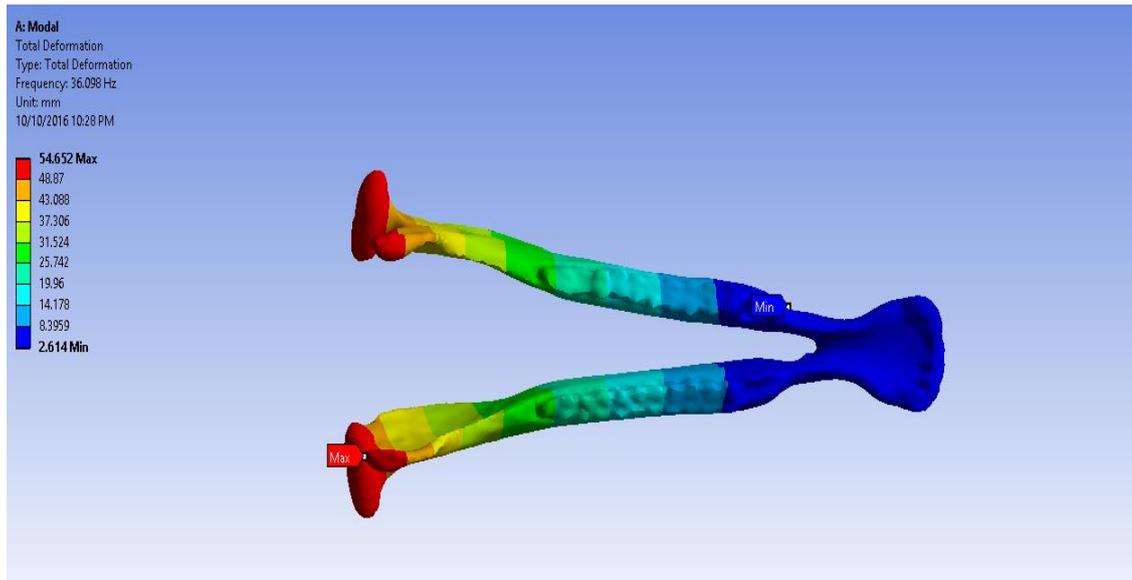


Figura 44. Deformaciones Modales vista superior ANSYS.

#### 4.2.3 Resumen de resultados Objetivo 2

3. Desarrollar un análisis por el método de elementos finitos del instrumento Quijada de Caballo.

A partir del modelado y simulación del instrumento Quijada de caballo por el método de elementos finitos se logró desarrollar un análisis modal del instrumento, obteniendo como resultado la deformación total del sistema y las frecuencias derivadas de las deformaciones modales. logrando concluir que.

- El sistema tiene un comportamiento modal predominante en las bandas de frecuencias entre 1khz y 10khz.
- Los rangos de frecuencias entre 600hz a 700hz, 1khz a 10khz y 8khz a 10khz tiene el mayor número de deformaciones modales.
- La simulación coincide con el comportamiento físico real del instrumento.
- La máxima deformación modal del instrumento se dará en el área de la rama cerca al cóndilo con una deformación máxima de 48.87mm.
- La deformación mínima se da en el área del cuerpo en el inicio de la zona dental con una deformación mínima de 2.614mm.
- La deformación media se da en área de la rama con una deformación media de 31.524mm.

### 4.3 Desarrollo ingenieril y resultados del objetivo

3. Analizar y comparar los resultados del análisis por el método de elementos finitos frente al método experimental.

Para el análisis y comparación de resultados, se confronta de manera directa las frecuencias resultantes del análisis por elementos finitos, ver tabla Tabla (2) sección anexo. Frente a las frecuencias resultantes por método experimental, Medición respuesta al impulso, ver Tabla (1) Sección anexo.

Se realizó un análisis para un rango de frecuencia a partir de 140hz hasta 10 kHz. Rango de frecuencia resultante del análisis por el método experimental, Ver tabla (11) y figura (45). Donde se listan y se muestra de manera gráfica la correlación de los resultados.

Frecuencias Medición		Frecuencias Simulación	Rango de error	% Error	#Modo
1	172hz	141.93hz	30.07hz	21.63%	M3
2	635hz	637.77hz	2.77hz	0.43%	M10
3	823hz	834.42hz	11.42hz	1.36%	M13
4	1000hz	1.061hz	61hz	5.74%	M15
5	1.400hz	1.395hz	5hz	0.35%	M19
6	1.600hz	1.661hz	61hz	3.67%	M21
7	1.800hz	1.790hz	10hz	0.55%	M23
8	2.300hz	2.217hz	83hz	3.74%	M27
9	3.200hz	3.190hz	10hz	0.31%	M34
10	3.600hz	3.601hz	1hz	0.02%	M30
11	4.100hz	4.123hz	23hz	0.55%	M44
12	5.400hz	5.345hz	55hz	1.02%	M54
13	5.900hz	5.969hz	69hz	1.15%	M57
14	7.900hz	7.974hz	74hz	0.92%	M70

Tabla (11) Frecuencias método experimental frente Frecuencias simulación.

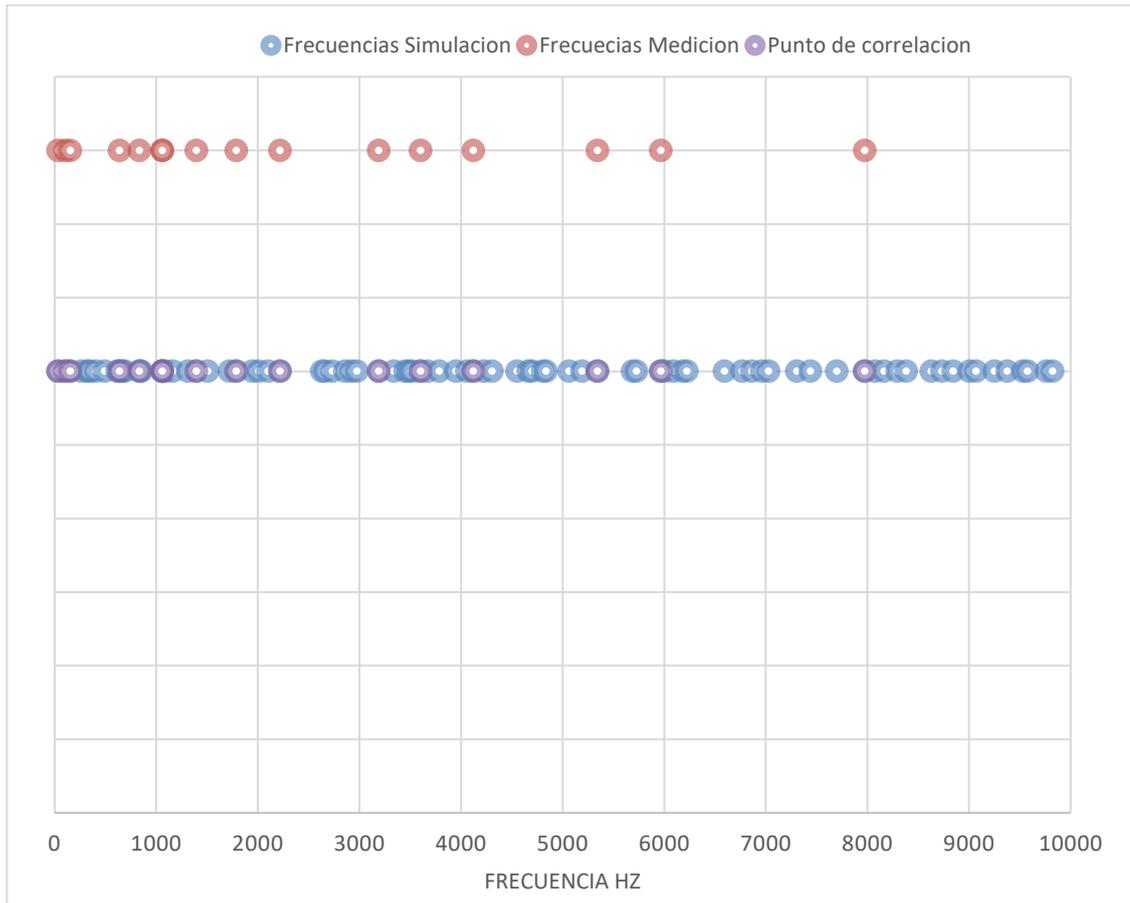


Figura 45. Grafica correlación Frecuencias método experimental vs Frecuencias simulación.

A partir de la confrontación de los resultados, ver tabla (11) y figura (45). Se logra determinar que la correlación de los datos es mayor a medida que aumenta el rango de frecuencia, la mayor concentración de energía y rango de mayor correlación se da en el rango de frecuencias entre 500hz y 6khz ver figura (45). Siendo este rango de frecuencias representativo en el aumento de deformaciones modales, demostrado en el análisis por el método de elementos finitos. La diferencia promedio entre frecuencias de la medición de respuesta al impulso y frecuencias obtenidas por el análisis por el método de elementos finitos es de 34.54hz con un porcentaje de error del 2.96%. La frecuencia con menor diferencia en su correlación es 3.601hz con una diferencia de 1hz y porcentaje de error del 0.02%, la frecuencia con mayor diferencia en su correlación es 2.217hz con una diferencia de 83hz, con un porcentaje de error del 3.74% y la frecuencia con mayor porcentaje de error es la frecuencia 141.93hz con un porcentaje de error del 21.63% ver tabla (11).

Las frecuencias fundamentales 635hz y 823hz derivadas de la medición de respuesta al impulso, poseen alta correlación frente a las frecuencias simuladas 637.77hz y 834.42hz Con un rango de error de 2.77hz y porcentaje de error del 0.43% y 11.42hz con un porcentaje de error del 1.36%, demostrando que los

resultados del análisis por elementos finitos son de acuerdo al comportamiento real del instrumento.

#### **4.3.1 Resumen de resultados Objetivo 3**

3. Analizar y comparar los resultados del análisis por el método de elementos finitos frente al método experimental.

A partir de la confrontación y análisis de los resultados Se concluye que.

- El método experimental y las simulaciones poseen una alta correlación entre el rango de frecuencias 600hz y 10khz.
- La diferencia promedio entre frecuencias de la medición y frecuencias obtenidas por la simulación es de 34.54hz con un porcentaje de error del 2.96%.
- La frecuencia obtenida a partir de la simulación con menor diferencia en su correlación es 3.601hz con una diferencia de 1hz y porcentaje de error del 0.02%.
- La frecuencia obtenida a partir de la simulación con mayor diferencia en su correlación es 2.217hz con una diferencia de 83hz con un porcentaje de error del 3.74%.
- EL modelo simulado es más preciso a medida que aumenta el rango de frecuencias.
- La correlación de los datos demuestra que los resultados del modelo simulado son conformes al comportamiento real del instrumento.
- Las frecuencias fundamentales 635hz,823hz. poseen alta correlación frente a las frecuencias simuladas 637.77hz con desviación de 2.77hz con porcentaje de error del 0.43% y 834hz con desviación de 11.42hz y porcentaje de error del 1.36%.

## CONCLUSIONES

Se determinaron las características físicas y acústicas del instrumento Quijada de caballos a partir de pruebas experimentales. Para las características físicas se realizaron pruebas de densidad, y ensayos mecánicos de compresión y flexión para los módulos de elasticidad. Como resultado se obtuvo una densidad del material de  $1.05 \text{ g/cm}^3$  y para los módulos elásticos se determinó el módulo de Young MPa en X 315,650, Y 390,380, Z 942,630, y el Coeficiente de Poisson en X 0.295, Y 0.100, Z 0.115.

Para las características acústicas se realizaron mediciones experimentales de respuesta al impulso, logrando obtener la respuesta en frecuencia del instrumento y sus frecuencias fundamentales en **635hz** y **823hz**. Dentro de las características acústicas del instrumento se identifican armónicos derivados de las fundamentales. Para la fundamental 635hz, armónicos en las frecuencias 1khz, 1.8khz, 2.3khz, 3.2khz, 3.6khz, 5.4khz, 8khz y para la fundamental 823hz armónicos en las frecuencias 1.6khz, 2.3khz, 3.2khz, 4.1khz, 5.9khz, 8khz, El rango de desviación promedio de los armónicos respecto a la serie armónica matemática de las fundamentales es de 215hz, siendo la frecuencia con menor desviación para la fundamental 635hz el armónico 3.2khz con una desviación de 25hz, la frecuencia armónica con mayor desviación frente a la serie matemática es 5.4khz con una desviación de 315hz. Para la familia armónica de la fundamental 823hz el armónico con menor desviación es 4.1khz con una desviación 15hz y el armónico con mayor desviación es el armónico en la frecuencia 5.9khz con una desviación de 684hz.

Dentro de las características acústicas del instrumento se destaca un comportamiento en su envolvente de Ataque rápido (0ms) y Decaimiento rápido (158ms), con variaciones en su amplitud marcadas en los primeros segmentos de tiempo entre 0ms y 20ms ver figuras (22) (23). Con una amplitud máxima en frecuencia de 25.8dbfs en 3.6khz, como se observa en la figura (27). Siendo la quijada de caballo un instrumento idiófono este posee características armónicas musicales como se puede observar en la tabla (7), donde se demuestra una relación de los armónicos con los intervalos musicales y se destacan los intervalos de Octava, quinta y de tercera mayor.

Para el desarrollo del análisis de la Quijada de caballo por el método de elementos finitos fue necesario recrear el instrumento por medio de técnicas de escaneo 3D, estas técnicas de modelado permitieron recrear de manera óptima el instrumento, disminuyendo la probabilidad de error por diferencias en la geometría frente a la estructura real, ver figura (38). A partir de este modelo se desarrolló un Análisis modal, obteniendo como resultado las frecuencias naturales derivadas de las deformaciones modales y las deformaciones modales totales del sistema. Con base en los resultados se concluye que el instrumento Quijada de caballo posee un comportamiento modal predominante en las frecuencias entre 1khz - 10khz y se destacan rangos de frecuencias con aumentos en las deformaciones modales entre 600hz - 700hz, 1khz - 10khz y 8khz - 10khz.

La máxima deformación modal del instrumento se dará en el área de la rama cerca al cóndilo con una deformación máxima de 48.87 mm esto se traduce en una máxima concentración de energía en esta área.

La mínima deformación modal se produce en el área del cuerpo en el inicio de la zona dental con una deformación mínima de 2.614mm y la deformación modal promedio se produce en el área de la rama con una deformación media de 31.524mm como se puede observar en las figuras (34) (35), y (36).

La confrontación de los resultados experimentales frente a los datos simulados permite concluir que existe correlación de los resultados a partir del rango de frecuencias 600hz hasta 10khz, y a medida que aumenta el rango de frecuencias las desviaciones entre frecuencias medidas y simuladas se hacen menores. Las frecuencias fundamentales 635hz,823hz. poseen alta correlación frente a las frecuencias simuladas 637.77hz con desviación de 2.77hz con un porcentaje de error del 0.43% y 834hz con desviación de 11.42hz y porcentaje de error del 1.36%. La diferencia promedio entre frecuencias obtenidas de la medición y frecuencias obtenidas por la simulación es de 34.54hz con un porcentaje de error del 2.96%. La frecuencia con menor desviación es 3.601hz con una desviación de 1hz con un porcentaje de error del 0.02% y la frecuencia con mayor desviación es 2.217hz con una desviación de 83hz 3.74%. El Análisis por el método de elementos finitos demuestra ser una herramienta efectiva y precisa para simular y predecir el comportamiento acústico y de vibraciones de instrumentos musicales.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda para futuras investigaciones la adquisición de la suite completa del software ANSYS, u otro software especializado en análisis de fenómenos acústicos por el método de elementos finitos por parte de la Universidad. Ya que la versión estudiantil posee limitaciones en el análisis de fenómenos acústicos.
- Se recomienda dar continuidad a esta investigación explorando otros análisis acústicos por el método por elementos finitos como son la directividad del instrumento y la respuesta armónica a una excitación transitoria.

## BIBLIOGRAFÍA

- **Nevill H Fletche, Thomas D. Rossing, The Physics of Musical Instruments**, Second Edition, Springer-Verlag, New York (1998)
- **Beltrán Francisco, Teoría General del Método de Elementos finitos**, Departamento de Mecánica Estructural y Construcciones Industriales – ETS ingenieros Industriales Madrid, 1998, PDF.
- **Discrete-time modelling of musical instruments Vesa Valimäki, Jyri Pakarinen, Cumhur Erkut and Matti Karjalainen** "Laboratory of Acoustics and Audio Signal Processing, Helsinki University of Technology PO Box 3000, FI-02015 TKK, Espoo, Finland.
- **SARMIENTO MOLINA, Luis Ernesto; PEREZ JIMENEZ, Gustavo Adolfo.** (2006). Análisis acústico de la gaita colombiana. Tesis de grado para optar por el título de Ingeniería de Sonido, Universidad de San Buenaventura, Bogotá.
- **Wilver Joany Viana Manosalva, Adriana Paola Victoria Gonzales.** (2006). Análisis acústico del instrumento de percusión tambor hembra aplicado a la microfonería del mismo. Tesis de grado para optar por el título de Ingeniería de Sonido, Universidad de San Buenaventura, Bogotá.
- **Hermida Cadena, Luis Fernando**, 2005 Análisis modal de la caja guitarra acústica variando sus dimensiones, Tesis de grado para optar por el título de Ingeniería de Sonido, Universidad de San Buenaventura Bogotá.
- **Elejab Arrieta, Jesús; Santamaría, C.** Estudio de la tapa harmónica de la guitarra por el método de elementos finitos 1999 Univ. del País Vasco. Dpto. de Física Aplicada.}
- **Laura Vanessa Acero Martínez, Cesar Darío Bustos Ortiz, Luis Fernando Hermida Cadena**, Análisis acústico de un tiple colombiano por medio de la obtención de la respuesta al impulso con método directo Primeras Jornadas Regionales De Acústica AdAA 2009 19 y 20 de noviembre 2009, Rosario Argentina.

- **Nicholas Rose, Damien** Holloway Finite element modelling of brass musical instruments 2012, Escuela de Ingeniería, Universidad de Tasmania, Hobart, Australia Proceeding of Acoustic 2012.
- **R. Corradi , P. Fazioli , S. Miccoli , G. Squicciarini** Modal analysis and finite element modelling of a grand piano soundboard 2011, Politécnico de Milano Departamento de ingeniería mecánica Milán Italia. 8 International Conference on Structural Dynamics EURODEX Wang, Jeffrey Nyman, X. Dong, H. Leng, 11 de noviembre de 2010.
- **Fundamental Biomechanics in Bone Tissue Engineering** Morgan & Claypool Publishers Editor.
- **CHRISTOPHER J. STRUCK**, AES Member, **AND STEVE F. TEMME**, AES Member. (1994). J Audio Eng Soc.: Simulated Free Field Measurements. Vol 42 (No. 6), 467- 482.
- **MIYARA, Federico.** Acústica y Sistemas de Sonido. Capítulos 1 – 5 del libro. Soporte teórico.
- **BIES A. David, HANSEN H. COLIN.** Engineering Noise Control. Theory and Practice. Fourth Edition. By Spon Press. London / New York. 2009.
- **Q. Howard and Benjamin S. Cazzolato** Acoustic Analyses Using MATLAB® and ANSYS® Carl by CRC Press, December 18, 2014.
- **Madenci, Erdogan, Guven, Ibrahim.** The Finite Element Method and Applications in ingeniering Using ANSYS CAPITULO 5 Sección 5.2.
- Chica E, L, F. 2010. **Chica E, Latorre F, Agudelo S.** Prótesis parcial fija: análisis biomecánico sobre distribución de esfuerzos entre tres alternativas de retención. Rev Fac Odontol Univ Antioq 2010.

## Sitios Consultados en Internet

- Disponible en Internet: <http://es.wikipedia.org/wiki/Idi%C3%B3fono> (Fecha de revisión marzo 03 2017).
- Disponible en Internet: <http://dictionary.onmusic.org/terms/1816-jawbone> (Fecha de revisión marzo 03 2017).
- Disponible en Internet: <http://es.slideshare.net/AnahiDaidouji/imagenes-de-la-cabeza> (Fecha de revisión marzo 03 2017).
- Disponible en Internet: [http://es.wikipedia.org/wiki/Espectro\\_de\\_frecuencias](http://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_de_frecuencias) (Fecha de revisión marzo 03 2017).
- Disponible en Internet: [http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_LTI](http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_LTI) (Fecha de revisión marzo 03 2017).
- Manual of Weighing Applications part 1 Density. Disponible en internet [http://www.dcu.ie/sites/default/files/mechanical\\_engineering/pdfs/manuals/DensityDeterminationManual.pdf](http://www.dcu.ie/sites/default/files/mechanical_engineering/pdfs/manuals/DensityDeterminationManual.pdf) (Fecha de revisión marzo 03 2017).

## ANEXO

Tabla 1. frecuencias y amplitud de frecuencias para segmentos de tiempo 10ms,92ms y 140ms.

Frecuencia		Amplitud Muestra 10ms	Amplitud muestra 92ms	Amplitud muestra 140ms
1	172hz	1.3dbfs	-6.9dbfs	-18dbfs
2	635hz	18.4 dbfs	<b>-11.0dbfs</b>	-17.9dbfs
3	823hz	15.7 dbfs	-2.6dbfs	-16.2dbfs
4	1khz	9.6 dbfs	-8.5dbf s	-22dbfs
5	1.4khz	19.9 dbfs	-8.9dbfs	-19.6dbfs
6	1.6khz	3.3 dbfs	-5.1dbfs	-12.8dbfs
7	1.8khz	16.5dbfs	<b>-0.7dbfs</b>	-11.9dbfs
8	2.3khz	<b>13dbfs</b>	-7.8dbfs	-14.7dbfs
9	3.2khz	14dbfs	-3.1dbfs	<b>-12.9dbfs</b>
10	3.6khz	<b>25.8dbfs</b>	-3.7dbfs	<b>-7.2dbfs</b>
11	4.1khz	7.7 dbfs	-10.8dbfs	-18dbfs
12	5.4khz	12.2 dbfs	-11.9dbfs	-18.8dbfs
13	5.9khz	9.7 dbfs	-13.6dbfs	-18.6dbfs
14	7.9khz	<b>-0.8 dbfs</b>	<b>-25.6dbfs</b>	<b>-31.1dbfs</b>

 Frecuencia máxima amplitud

 Frecuencia Amplitud media

 Frecuencia Amplitud Mínima

Tabla 2. Análisis modal Frecuencias naturales.

<b>Modo</b>	<b>Frecuencia Hz</b>	<b>Modo</b>	<b>Frecuencia Hz</b>
<b>1</b>	36.098	<b>23</b>	1790.1
<b>2</b>	104.15	<b>24</b>	1946.2
<b>3</b>	141.93	<b>25</b>	2010.3
<b>4</b>	267.76	<b>26</b>	2102.2
<b>5</b>	324.45	<b>27</b>	2217.9
<b>6</b>	349.24	<b>28</b>	2632.5
<b>7</b>	409.03	<b>29</b>	2662.6
<b>8</b>	493.33	<b>30</b>	2733.9
<b>9</b>	618.04	<b>31</b>	2859.5
<b>10</b>	637.77	<b>32</b>	2922.1
<b>11</b>	669.37	<b>33</b>	2976.2
<b>12</b>	689.73	<b>34</b>	3190.1
<b>13</b>	834.42	<b>35</b>	3340.3
<b>14</b>	854.51	<b>36</b>	3450.3
<b>15</b>	1061.1	<b>37</b>	3486.2
<b>16</b>	1096.2	<b>38</b>	3518.5
<b>17</b>	1166.3	<b>39</b>	3601.7
<b>18</b>	1314.3	<b>40</b>	3673.2
<b>19</b>	1395.3	<b>41</b>	3788
<b>20</b>	1505.7	<b>42</b>	3951.5
<b>21</b>	1661.3	<b>43</b>	4059.6
<b>22</b>	1721.5	<b>44</b>	4123.2

<b>45</b>	4224	<b>70</b>	7974.9
<b>46</b>	4304.3	<b>71</b>	8078.0
<b>47</b>	4553.4	<b>72</b>	8166.1
<b>48</b>	4664.5	<b>73</b>	8295.8
<b>49</b>	4700.7	<b>74</b>	8385.1
<b>50</b>	4806.4	<b>75</b>	8629.3
<b>51</b>	4837.4	<b>76</b>	8735.4
<b>52</b>	5064.5	<b>77</b>	8845.6
<b>53</b>	5191.6	<b>78</b>	9006.9
<b>54</b>	5345.6	<b>79</b>	9071.6
<b>55</b>	5688.7	<b>80</b>	9250.7
<b>56</b>	5725.9	<b>81</b>	9376.5
<b>57</b>	5969.1	<b>82</b>	9534.1
<b>58</b>	6005.6	<b>83</b>	9576.3
<b>59</b>	6092.9	<b>84</b>	9762.5
<b>60</b>	6183.4	<b>85</b>	9824.1
<b>61</b>	6225.5	<b>86</b>	10011
<b>62</b>	6594.2	<b>87</b>	10122
<b>63</b>	6769.6	<b>88</b>	10301
<b>64</b>	6864.5	<b>89</b>	1592
<b>65</b>	6962.9	<b>90</b>	10690
<b>66</b>	7027.2	<b>91</b>	10921
<b>67</b>	7307.8	<b>92</b>	11007
<b>68</b>	7439.7	<b>93</b>	11127
<b>69</b>	7698.7	<b>94</b>	11520

<b>95</b>	11739	<b>107</b>	15154
<b>96</b>	11905	<b>108</b>	15516
<b>97</b>	12025	<b>109</b>	15879
<b>98</b>	12339	<b>110</b>	16160
<b>99</b>	12662	<b>111</b>	16354
<b>100</b>	13019	<b>112</b>	16354
<b>101</b>	13182	<b>113</b>	16373
<b>102</b>	13334	<b>114</b>	16594
<b>103</b>	13462	<b>115</b>	16680
<b>104</b>	14021	<b>116</b>	16779
<b>105</b>	14587	<b>117</b>	16854
<b>106</b>	14947	<b>118</b>	16930

Tabla 2. Análisis modal Frecuencias naturales.