



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
DE INGENIERO MECATRÓNICO**

**TEMA: DISEÑO DE UN EQUIPO PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL  
MÓDULO DE ELASTICIDAD EN DIVERSOS MATERIALES  
ORTOTRÓPICOS**

**AUTORES: LÓPEZ RODRÍGUEZ, CÉSAR FABIÁN  
ORTUÑO PAZMIÑO, FERNANDO DAVID**

**DIRECTOR: ING. NARVÁEZ MUÑOZ, CHRISTIAN PATRICIO Msc.**

**SANGOLQUÍ**

**2019**

## CERTIFICACIÓN TRABAJO DE TITULACION



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

### CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "DISEÑO DE UN EQUIPO PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN DIVERSOS MATERIALES ORTOTRÓPICOS" fue realizado por el señor López Rodríguez, César Fabián y el señor Ortuño Pazmiño, Fernando David, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 14 de diciembre del 2018

Ing. Christian Patricio Narváez Muñoz Msc.  
Director

## AUTORIA DE RESPONSABILIDAD



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

### AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, López Rodríguez César Fabián, con C.I. 1718452962 y Ortuño Pazmiño Fernando David, con C.I. 1721543815, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación "DISEÑO DE UN EQUIPO PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN DIVERSOS MATERIALES ORTOTRÓPICOS" es de nuestra autoría y responsabilidad cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 14 de diciembre del 2018

César Fabián López Rodríguez

CI: 1718452962

Fernando David Ortuño Pazmiño

CI: 1721543815

## AUTORIZACIÓN



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

### AUTORIZACIÓN

Nosotros, López Rodríguez César Fabián y Ortuño Pazmiño Fernando David, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación "DISEÑO DE UN EQUIPO PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN DIVERSOS MATERIALES ORTOTRÓPICOS" en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 14 de diciembre del 2018

César Fabián López Rodríguez

CI: 1718452962

Fernando David Ortuño Pazmiño

CI: 1721543815

## DEDICATORIA

Este trabajo de investigación va dedicado principalmente a Dios, por darme salud, fuerzas y sabiduría para poder afrontar este reto y ser mi guía en las diferentes decisiones dentro y fuera del ámbito universitario; a mi madre Rocío por ser la persona más importante en mi vida, por ser ese ejemplo a seguir, estar en los momentos buenos y principalmente en los duros de la vida siempre con su apoyo y consejo oportuno además de ser el motor principal para poder terminar este proceso; a mi familia por su apoyo incondicional, a mis amigos por ser esa segunda familia que siempre estuvo ahí para recordarme que el mundo no termina en la puerta de la universidad, para todos va dedicado este logro.

César López

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a Dios, por ser mi escudo y fortaleza dentro de todo este proceso, por ser mi guía y darme la oportunidad de servirle estos años sin que influya drásticamente en el avance de este reto, además por brindarme la sanidad necesaria en momentos duros de mi vida.

A mi madre Rocío por estar incondicionalmente conmigo, por todo el apoyo en todos los aspectos de mi vida, por ser la más fuerte manifestación del amor de Dios en la tierra hacia mí, por cubrir todos los aspectos necesarios en el avance de la carrera.

A mi familia, por todo el apoyo brindado en este tiempo y estar siempre pendientes de nosotros.

A mis amigos, por ayudarme a mantener mi esencia como ser humano, por ser buenos consejeros y por permitirnos tener una buena actitud en la vida.

A la universidad de las Fuerzas armadas que me abrió las puertas, y me dio la oportunidad de aprender tanto en conocimiento como en las diferentes lecciones de la vida.

Al Ing. Christian Narváez, nuestro director, por compartir con nosotros sus conocimientos, con su tiempo dedicación y paciencia, permitiendo culminar el proyecto con éxito.

A todas las personas que de una u otra manera, me brindaron apoyo en esta etapa.

*César López*

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mi familia quienes han estado a mi lado todo este tiempo brindándome su apoyo incondicional en buenos y malos momentos, contando con sus consejos y experiencia en cada etapa de mi vida, los cuales fueron base fundamental para alcanzar mis metas.

También dedico este trabajo a mis amigos, compañeros de viaje, quienes fueron parte de los momentos de triunfo y brindaban su apoyo aun en aquellas ocasiones de derrota.

Fernando Ortuño

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco principalmente a mi padre Freddy y a mi madre Cecibel quienes siempre supieron encaminar mis pasos para convertirme en una persona capaz de luchar por sus metas, quienes brindaron en todo momento un consejo y compartieron sus experiencias guiándome en la vida.

A mi familia que brindaron una sonrisa y palabras de apoyo cuando más las necesitaba, brindando la energía para completar mis metas.

A mis amigos quienes prestaron su apoyo en las buenas y las malas, convirtiendo mi tiempo en la universidad en toda una aventura.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE lugar donde pude aumentar mis conocimientos y formarme como un profesional.

Al Ingeniero Christian Narváez por guiar el trabajo de titulación y brindar su apoyo académico.



## INDICE DE CONTENIDO

CERTIIFICACIÓN TRABAJO DE TITULACION .....	i
AUTORIA DE RESPONSABILIDAD .....	ii
AUTORIZACIÓN .....	iii
DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTOS .....	v
DEDICATORIA .....	vi
AGRADECIMIENTOS .....	vii
INDICE DE CONTENIDO .....	viii
INDICE DE TABLAS.....	xi
INDICE DE FIGURAS .....	xii
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT .....	xv
CAPÍTULO I.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Antecedentes .....	2
1.3. Definición del proyecto .....	7
1.4. Objetivos .....	8
1.4.1. Objetivo general.....	8
1.4.2. Objetivos Específicos.....	8
1.5. Justificación e Importancia .....	9
1.6. Alcance.....	10
1.6.1. Componentes mecánicos .....	11
1.6.2. Componentes electrónicos/eléctricos .....	12

1.6.2.2. Sensores .....	12
1.6.3. Componentes del Sistema de Control .....	14
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>15</b>
2.1. Propiedades Elásticas de los Materiales .....	15
2.1.1 Módulo de Elasticidad .....	16
2.1.2. Resistencia de Materiales Teórica .....	17
2.1.3. Resistencia de Materiales Experimental .....	17
2.2 Módulo de Elasticidad Estático y Dinámico .....	17
2.3 Ensayos no Destructivos en Madera.....	21
2.3.1. Ensayos no Destructivos (Estático a Flexión) .....	23
2.3.2. Técnicas de Vibración transversal .....	23
2.3.3 Métodos de Ultrasonido .....	23
2.3.4 Métodos Acústicos .....	24
2.3.5 Espectro visible .....	24
2.3.6. Método de Conductividad (Propiedades Eléctricas).....	24
2.4. Transformada de Fourier.....	25
2.5 Espectro de Frecuencia .....	25
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>28</b>
3.1. Metodología del Diseño.....	28
3.1.1 Definición de Necesidades.....	28
3.1.2. Características Técnicas.....	29
3.2. Subsistema Mecánico .....	32

3.2.1. Mecanismo de Sujeción .....	32
3.2.2. Mecanismo de Impacto .....	35
3.2.3. Construcción de la Estructura .....	35
3.3. Subsistema Electrónico .....	39
3.3.1. Sistema Analógico .....	39
3.3.2 Sistema Digital .....	42
3.4. Subsistema de Control .....	44
3.4.1. Tarjeta de Adquisición de Datos (DAQ) .....	44
3.4.2. Raspberry PI 2 .....	47
3.4.3. Cámara de Alta Velocidad .....	50
CAPÍTULO IV .....	52
4.1. Funcionamiento.....	52
4.2. Análisis de resultados .....	53
4.2.1. Madera de Chonta .....	54
4.2.2. Madera de Bambú.....	61
CAPÍTULO V .....	73
5.1 Conclusiones.....	73
5.2. Recomendaciones.....	75
5.3. Trabajos futuros .....	76
BIBLIOGRAFÍA.....	77

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> <i>Necesidades de diseño</i> .....	29
<b>Tabla 2.</b> <i>Características técnicas del diseño</i> .....	29
<b>Tabla 3.</b> <i>Resultados de matriz de calidad</i> .....	31
<b>Tabla 4.</b> <i>Valores de gravedad vs voltaje</i> .....	41
<b>Tabla 5.</b> <i>Valores calculados de MOE</i> .....	59
<b>Tabla 6.</b> <i>Resultados Obtenidos de MOE por ensayo no destructivo</i> .....	65
<b>Tabla 7.</b> <i>Datos obtenidos de MOE del Bambú</i> .....	71

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Prototipo para ensayos de determinación de Módulo de Elasticidad de la madera .....	3
<b>Figura 2.</b> Dispositivo de ensayo para determinación de módulo de elasticidad. ....	5
<b>Figura 3.</b> Madera como material ortotrópico, disposición de sus 3 ejes. ....	15
<b>Figura 4.</b> Curva Esfuerzo Deformación. ....	16
<b>Figura 5.</b> Máquina de Ensayos no destructivos Grindosonic MK7. ....	19
<b>Figura 6.</b> Banco de Ensayos no destructivos Metriguard 340 E Computer. ....	21
<b>Figura 7.</b> Relación de fenómeno ondulatorio entre el dominio del tiempo y el dominio de la frecuencia. ....	27
<b>Figura 8.</b> Casa de la Calidad correspondiente al proyecto .....	30
<b>Figura 9.</b> Mecanismo de sujeción y desplazamiento .....	33
<b>Figura 10.</b> Elemento de Sujeción.....	34
<b>Figura 11.</b> Elemento de desplazamiento .....	34
<b>Figura 12.</b> Mecanismo de Impacto.....	35
<b>Figura 13.</b> Ubicación y detalle de los agujeros a realizarse .....	36
<b>Figura 14.</b> Parámetros de corte .....	39
<b>Figura 15.</b> Sensor ADXL335 .....	40
<b>Figura 16.</b> Diagrama de conexión del acelerómetro ADXL335 con tarjeta de adquisición.....	41
<b>Figura 17.</b> Sensor BNO 055 Adafruit .....	43
<b>Figura 18.</b> Diagrama de conexión Sensor BNO055 con procesador .....	43
<b>Figura 19.</b> Tarjeta de Adquisición de datos National Instruments.....	45
<b>Figura 20.</b> Interfaz Humano Máquina Realizada en LabView .....	46
<b>Figura 21.</b> Script utilizado para la obtención de la frecuencia.....	47
<b>Figura 22.</b> Raspberry Pi 2 con sus diferentes componentes.....	48
<b>Figura 23.</b> Interfaz de inicio del sistema operativo Raspbian.....	49
<b>Figura 24.</b> Interfaz Humano Máquina desde sistema operativo Raspbian.....	50

<b>Figura 25.</b> Cámara de alta velocidad PHANTOM V2512 .....	51
<b>Figura 26.</b> Ejemplo del tracking (seguimiento), realizado por la cámara .....	51
<b>Figura 27.</b> Diagrama de flujo del funcionamiento del proyecto .....	52
<b>Figura 28.</b> Probeta #1 (Madera de chonta) .....	54
<b>Figura 29.</b> Probeta #2 (Madera de chonta) .....	54
<b>Figura 30.</b> Datos adquiridos con Acelerómetro ADXL335. ....	55
<b>Figura 31.</b> Datos adquiridos con Cámara de Alta Velocidad PHANTOM V2512 .....	56
<b>Figura 32.</b> Datos representados en hoja de celdas. ....	57
<b>Figura 33.</b> Espectro de frecuencias Datos Acelerómetros .....	58
<b>Figura 34.</b> Espectro de frecuencia Datos Cámara .....	58
<b>Figura 35.</b> Resultados adquiridos en estudios previos .....	60
<b>Figura 36.</b> Probeta de Madera de Bambú.....	61
<b>Figura 37.</b> Datos adquiridos con el Acelerómetro ADXL335.....	62
<b>Figura 38.</b> Datos adquiridos con Acelerómetro BNO055 .....	63
<b>Figura 39.</b> Espectro de frecuencias sensor Acelerómetro ADXL335 .....	64
<b>Figura 40.</b> Espectro de frecuencias Acelerómetro BNO055 .....	64
<b>Figura 41.</b> Probeta de Bambú.....	65
<b>Figura 42.</b> Datos adquiridos con acelerómetro .....	66
<b>Figura 43.</b> Datos adquiridos con Cámara de alta velocidad PHANTOM V2512 .....	67
<b>Figura 44.</b> Datos adquiridos con análisis de imagen .....	68
<b>Figura 45.</b> Espectro de frecuencia datos adquiridos con acelerómetro .....	69
<b>Figura 46.</b> Espectro de frecuencia datos adquiridos con cámara .....	70
<b>Figura 47.</b> Características técnicas del Bambú .....	72

## RESUMEN

El presente proyecto de investigación plantea el estudio de los ensayos no destructivos en materiales ortotrópicos, específicamente madera, para ello se construyó una máquina de ensayos, la cual a partir de las vibraciones generadas en una probeta sometida a una sujeción en cantiléver y una fuerza aplicada, permitirá determinar el módulo de elasticidad dinámico. Para realizar el ensayo se utilizó el tallo de la palma *Bactris gasipaes* Kunth (Chonta) como material principal. Se utiliza un mecanismo de impacto para aplicar una fuerza capaz de hacer vibrar a dicho material y obtuvo la aceleración producida por el impacto mediante un conjunto de acelerómetros, la cual permitió encontrar la frecuencia natural del sistema para finalmente obtener el MOE dinámico del mismo por ensayos no destructivos, para el procesamiento de dicha aceleración. Se utilizó una validación analógica con un acelerómetro ADXL 335 y una digital con el acelerómetro BNO 055, los dos en interfaces distintas de monitoreo, como método alternativo de validación se utilizó la cámara PHANTOM V2512 de alta velocidad para determinar dicha aceleración, finalmente se compararon los resultados con el MOE Estático adquirido por investigaciones anteriores.

### Palabras Clave

- **CHONTA**
- **ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS**
- **MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO**
- **CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE MATERIALES**

## **ABSTRACT**

The present research project proposes the study of non-destructive tests on orthotropic materials, specifically wood, for which a test machine was built, which from the vibrations generated in a test subject to cantilever and an applied force will allow to determine the dynamic modulus of elasticity. To carry out the trial, the stem of the palm *Bactris gasipaes* Kunth (Chonta) was used as the main material. An impact mechanism is used to apply a force capable of vibrating said material and obtain the acceleration produced by the impact using a set of accelerometers, which allowed to find the natural frequency of the system to finally obtain the dynamic MOE with a non-destructive procedure. In order to acquire data representing the vibrations an analog accelerometer was used with an ADXL 335 accelerometer and a digital one with the BNO 055 accelerometer, both in different monitoring interfaces, as an alternative method of validation the PHANTOM V2512 high-speed camera was used to determine this acceleration, the final results were compared with the Static MOE acquired by previous investigations.

### **Keywords**

- **CHONTA**
- **NON-DESTRUCTIVE ESSAYS**
- **DYNAMIC ELASTICITY MODULE**
- **DYNAMIC CHARACTERIZATION OF MATERIALS**



# CAPÍTULO I

## GENERALIDADES

### 1.1. Introducción

El conocimiento de las propiedades mecánicas de un material permite determinar sus aplicaciones a partir de parámetros como resistencia, elasticidad, dureza, etc., ya que en los elementos mecánicos producidos con dicho material será sometido diferentes esfuerzos.

La determinación de estas propiedades mecánicas se realiza a partir de una variedad de diversos ensayos mecánicos, tanto destructivos como no destructivos con muestras estandarizadas del material.

Es posible, además, conocer la variación de estas propiedades en condiciones dinámicas, para lo cual, los ensayos deben ser capaces de adquirir dicha información bajo las nuevas condiciones.

Los ensayos dinámicos no destructivos brindan la capacidad de conocer la respuesta de un material bajo condiciones dinámicas sin necesidad de fracturar o destruir a la probeta bajo estudio.

El principio de almacenamiento de energía y su capacidad de disipación de la misma puede ser utilizado como base para el desarrollo de un ensayo de propiedades no destructivo. La composición estructural de la probeta influirá a la resistencia estática y dinámica del material estudiado. Materiales como la madera serán beneficiados en gran

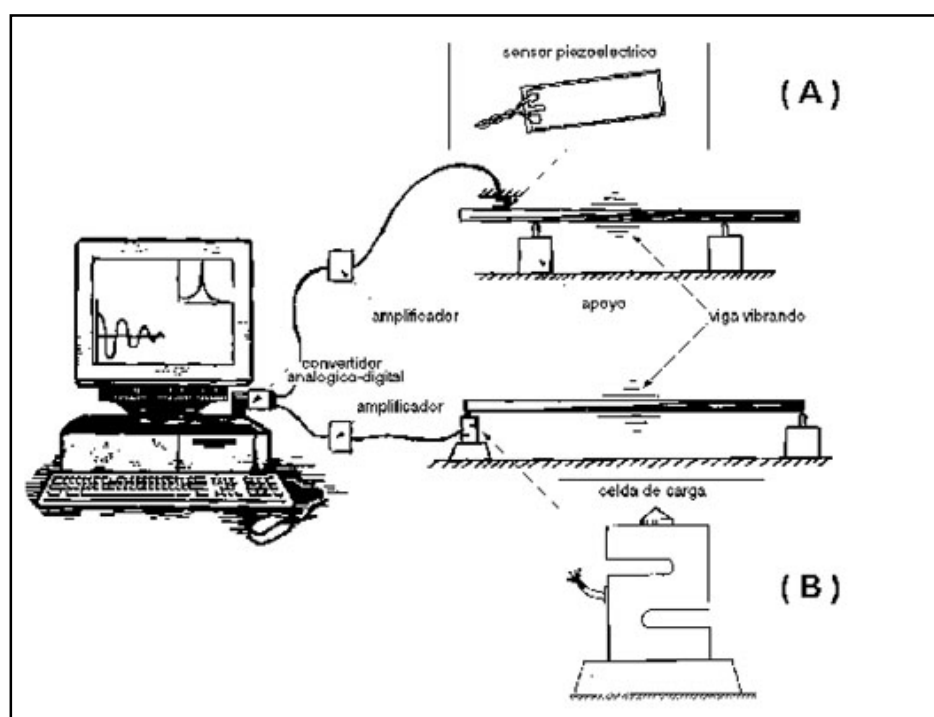
manera de este tipo de ensayos ya que brindan un método sencillo de análisis de su estructura interna.

El diseño del equipo planea entregar una maquina capaz de permitir la adquisición sencilla de datos necesarios para la determinación de características dinámica de un material, especialmente de materiales isotrópicos.

## **1.2. Antecedentes**

La caracterización dinámica de los materiales se refiere al establecimiento de las características de un material determinado sometido bajo la acción de cargas dinámicas. Una carga dinámica es aquella carga que al aplicarse varia en intensidad y posición.

Entre los estudios referentes al tema de caracterización de material, específicamente determinación del módulo de elasticidad, se encuentra el artículo publicado por Ricardo Baettig en el año 2001 sobre “Determinación del Módulo de Elasticidad de la madera mediante vibraciones transversales”, la cual tiene como objetivo el diseño y fabricación de 2 prototipos para calcular las propiedad mecánicas de la madera, los cuales se encuentran basados en la norma ASTM E18-7699(A) y en el equipo 340E-Computer(B) de Metricguard como se observa en la Figura 1 (Baetigg, 2001).



**Figura 1.** Prototipo para ensayos de determinación de Módulo de Elasticidad de la madera

Fuente: (Metricguard)

En los 2 prototipos, la vibración se indujo dando un leve golpe metálico en el centro de las probetas, en la figura 1 se observa las 2 configuraciones notadas por las letras A y B, en el prototipo A se utilizó un sensor piezoeléctrico para medir las vibraciones producidas con leves señales eléctricas de respuesta, en el prototipo B se ubica una celda de carga en uno de los apoyos, teniendo como ventaja adicional a la retroalimentación de las vibraciones, la capacidad de medir el peso de cada probeta.

Dentro del trabajo mencionado, se hace referencia a las siguientes fórmulas, extraídas del trabajo de Ross y Pellerin (1991), en dicha publicación se expone la analogía entre el

comportamiento de una viga simplemente apoyada vibrando libremente y la vibración de una masa atada a un resorte y un amortiguador. A partir de dicha analogía y tomando en cuenta la geometría de la viga (momento de inercia,  $I$  y longitud total,  $L$ ) y las condiciones de apoyo, es posible calcular el módulo de elasticidad dinámico como:

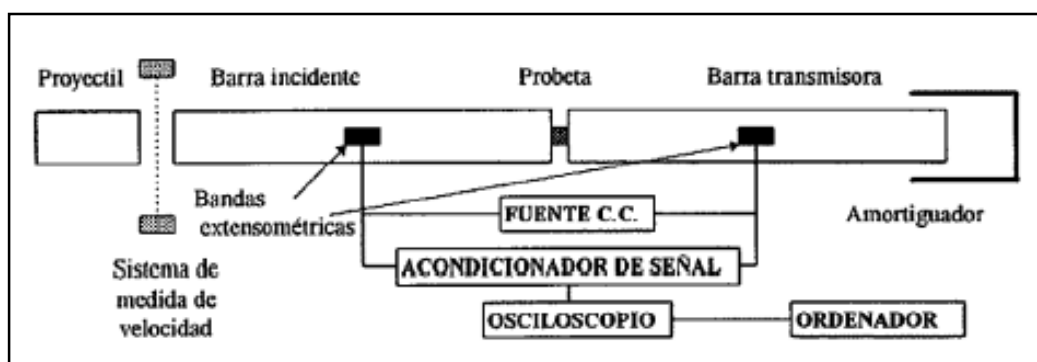
$$MOE = (m f^2 L^3) / (12,65 I) \quad (1)$$

$$MOE = (m f^2 L^3) / (2,46 I) \quad (2)$$

La primera ecuación es válida para condiciones de apoyo en los nodos de la vibración, es decir, usando una luz de 55,2% de  $L$  (ASTM, 1999) y la segunda para condiciones de apoyo cerca de sus extremos (Metriguard Inc., 1990). Como resultado del trabajo, se plantea la factibilidad de la utilización de los 2 prototipos, obteniendo errores del 0.4% y 2% respectivamente.

Otro estudio referente al tema propuesto, es el realizado por Khalifa y Barbero en el año 2007 sobre "Caracterización Dinámica mediante barra Hopkinson de materiales cerámicos, monolíticos y compuestos", con objetivo caracterización en compresión dinámica a alta velocidad de deformación de materiales cerámicos de alúmina utilizando el dispositivo denominado barra Hopkinson. El equipo barra Hopkinson de compresión es un dispositivo normalmente utilizado para materiales metálicos. Los ensayos en materiales cerámicos en este estudio no son normalizados debido a esta limitación en el equipo por lo que se desarrollaron metodologías propias. La barra Hopkinson es un equipo que contempla la utilización de dos barras de acero inoxidable conocidas como incidente y transmisora con sus caras planas y ortogonales a sus ejes (Khalifa, 2007).

El dispositivo de ensayo contempla, tal como se muestra en la Figura 2, la utilización de dos barras de acero inoxidable (incidente y transmisora), con sus caras perfectamente planas y ortogonales a sus ejes, entre las que se coloca una probeta cilíndrica del material a ensayar (Khalifa, 2007).



**Figura 2.** Dispositivo de ensayo para determinación de módulo de elasticidad.

*Fuente: (Khalifa, 2007)*

Sobre la barra incidente se hace impactar un proyectil cilíndrico impulsado por aire comprimido. El impacto origina una onda de compresión que se propaga en la barra hasta llegar a la probeta, donde parte se transmite a la segunda barra y parte se refleja (Khalifa, 2007) (Almeida & Martínez, 2015).

Tomando el trabajo de titulación “Caracterización Dinámica de la Madera de Balsa en Ecuador”, realizado en la Universidad de las Fuerzas Armadas por los estudiantes Fernando Almeida y Miguel Martínez en el año 2015, como parte del proceso de caracterización del MOE dinámico:

El análisis dinámico está centrado en la medición de las propiedades mecánicas por medio de un estudio de las respuestas de vibración para un sistema dinámico lineal representado por la combinación de movimientos armónicos simples, mediante una excitación inicial proporcionado por una fuerza de impacto, provocando la tendencia oscilatoria de la probeta, determinando de esta manera la frecuencia natural, la aceleración con respecto al tiempo, y una combinación de los mismos para obtener un espectro de frecuencias(Almeida, 2015).

En vista de las circunstancias del ensayo este no está normado, pero se ha trabajado con la técnica de vibración en vigas, desarrollando una metodología propia para la realización del mismo (Almeida, 2015).

A continuación, se detallan los 3 sistemas principales del experimento:

- **Sistema de Sujeción:**

Se encuentra formando el sistema de empotramiento de la probeta, está compuesto por la parte estructural, una prensa con caras planas de 150 mm de longitud de abertura y pernos de ajuste a la bancada (Almeida, 2015).

- **Sistema de Fuerza:**

Es la parte que proporciona el impulso inicial, está compuesta por un mango superior con un eje que hace las veces de un martillo, una mariposa de sujeción que tiene la función de regular la altura de impacto, el sistema estructural cuyo cargo es la de soporte

del mecanismo de fuerza, por último, una celda de carga miniatura en forma de botón que determina la fuerza de impacto (Almeida & Martinez, 2015)

- **Sistema de Adquisición de Datos:**

A continuación de detallas los elementos utilizados para dicha etapa (Almeida & Martinez, 2015):

1. Sensor de Aceleración
2. Sensor de posición
3. Visor de Fuerza
4. Sistema de Acoplamiento de Señales a la DAQ
5. Software de Adquisición de Datos

Tomaremos como punto de partida el último proyecto mencionado para el desarrollo del presente proyecto.

### **1.3. Definición del proyecto**

El proyecto pretende utilizar un sistema de acelerómetros en 3 dimensiones para reconocer el movimiento característico de un material después de ser impactado, a partir de dicha información, las características de las oscilaciones (frecuencia, tiempo de estabilidad, forma, etc.) poder definir las propiedades del material.

Se utilizarán a demás análisis visuales utilizando una cámara de alta velocidad para determinar la posición de un punto de estudio a lo largo del tiempo, determinando se velocidad y aceleración en cada intervalo.

El proyecto consta de una bancada en la cual existen un sistema de entenalla desplazable en la cual se montará el material a ser analizado, empotrado en un extremo; y del otro extremo se realizará un impacto con el fin de hacer vibrar a la muestra del material.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo general**

Diseño de un equipo para la caracterización del MOE en diversos materiales ortotrópicos.

### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- Realizar la caracterización de un material a partir de su reacción en posición, velocidad y aceleración ante una fuerza.
- Diseñar e implementar un equipo de ensayos de módulo de elasticidad, con capacidad de toma y análisis de datos.
- Analizar los resultados obtenidos y determinar las características del material ensayado.
- Determinar la eficiencia de nuevos ensayos no destructivos para la caracterización de materiales.



### **1.5. Justificación e Importancia**

La Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, específicamente el departamento de Ciencias de la Ingeniería y Mecánica, se encuentra en desarrollo de investigación y vinculación con la sociedad.

Actualmente el nivel de investigación acerca de la caracterización dinámica de un material es escaso en el país, siendo práctica común el desconocimiento de las características propias de los materiales y debido a esto se producen fallas por la mala utilización de los mismos.

Es completamente necesario el estudio, ya que se requiere analizarse las posibles aplicaciones de los materiales utilizados en construcción y permitiendo una mayor facilidad de análisis de nuevos materiales, creando fuentes de investigación y empleo.

El proceso de obtención de las características mecánicas de un material consiste en método mecánicos que utilizan tecnologías del tipo hidráulico y acoples mecánicos que pueden generar fallas de medición.

Además, son ensayos de tipo destructivo en los cuales la probeta debe ser destruida para poder obtener sus características, lo cual nos brinda dificultades al momento de analizar materiales de alto costo, de baja cantidad o difícil manufactura.

El presente proyecto plantea desarrollar un mecanismo que permita realizar ensayos de caracterización de materiales ortotrópicos, brindando como principal característica, ensayos no destructivos, capaces de analizar los módulos propios de cada material en

sus 3 ejes, utilizando herramientas más precisas como son el uso de acelerómetros y cámaras de alta velocidad, siendo métodos que son menos propensos a presentar errores de medición, para el manejo de los elementos necesarios, los investigadores, docentes y estudiantes del área del Laboratorio de Reología y Fluidos Complejos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, fortalecerán los conocimientos de este tipo de tecnología, con fines investigativos para trabajos futuros.

Con base al Plan del Buen Vivir, objetivo nacional 4 y 10 este proyecto pretende contribuir a fortalecer y potencializar las capacidades de la ciudadanía en cuanto a la investigación científica y tecnológica, Políticas 4.4, 4.6 que mencionan la generación de conocimiento y la interacción recíproca entre la educación, sector productivo y la investigación científica y tecnológica, para la transformación de la matriz productiva y la satisfacción de necesidades.

### **1.6. Alcance**

El proyecto tiene como finalidad caracterizar un material bajo cargas dinámicas a partir de su repuesta y las vibraciones de su posición, velocidad y aceleración en el tiempo. Además, se pretende realizar la implementación de un sistema de datos para cargas dinámicas en el equipo y su correspondiente software para el análisis de las muestras adquiridas.

### **1.6.1. Componentes mecánicos**

El módulo de Young o módulo de elasticidad longitudinal es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza.

Tanto el módulo de Young como el límite elástico son distintos para los diversos materiales. El módulo de elasticidad es una constante elástica que, al igual que el límite elástico, puede encontrarse empíricamente mediante ensayo de tracción del material. Además de este módulo de elasticidad longitudinal, puede definirse el módulo de elasticidad transversal de un material.

Inicialmente sólo se usaron métodos estáticos para medir propiedades mecánicas en probetas pequeñas y de tamaño estructural. Las propiedades más frecuentemente medidas estáticamente han sido flexión, compresión y tracción paralela a la fibra.

El objetivo principal es estudiar la relación existente entre el uso de técnicas de vibración transversal y longitudinal para la determinación del módulo de elasticidad dinámico.

#### **1.6.1.1. Estructura de soporte**

Este componente, es la base para el extrusor que va posicionado de forma horizontal, además es el soporte para sensores, actuadores y mecanismos de sujeción de los materiales. Es necesario que proporcione robustez y seguridad para evitar posibles

complicaciones de inestabilidad en el momento del funcionamiento, evitando así ruido por vibraciones ajenas al material analizado.

#### **1.6.1.2. Mecanismo de agarre**

Se requiere un mecanismo de agarre que mantenga en posición a la probeta a analizarse, evitando cualquier tipo de deslizamiento. El mecanismo se encuentra en un extremo de la estructura de soporte, opuesto al sistema de impacto.

#### **1.6.1.3. Mecanismo de impacto**

Para evaluar las características dinámicas de la probeta, es necesario aplicar una fuerza, la cual será suministrada por un mecanismo de impacto, el cual debe ser diseñado teniendo en cuenta que debe golpear a la probeta una sola vez, evitando cualquier tipo de interferencia una vez se ha aplicado la fuerza

### **1.6.2. Componentes electrónicos/eléctricos**

#### **1.6.2.1. Actuadores**

Se utilizará un motor eléctrico que nos permita manipular mediante la HMI la operación del sistema de impacto, realizando un movimiento rápido y preciso a fin de evitar golpes dobles que afecten la toma de datos.

#### **1.6.2.2. Sensores**

Al ser la madera un material orto trópico, se determinan los módulos de elasticidad en los tres planos, radial, tangencial y axial. Parea esto se utiliza un acelerómetro de 3 ejes. El sensor utilizado es:

Este sensor (MMA7361) es un acelerómetro analógico de 3 ejes (x,y,z). El nivel de las medidas del acelerómetro, nos permite medir la aceleración, o la inclinación de una plataforma con respecto al eje terrestre. Otras características que tiene son el modo sleep, acondicionamiento de señal, filtro pasa bajas de 1 polo, compensación de temperatura, auto prueba, y detección de 0g para caída libre. Este sensor funciona con alimentaciones entre 2.2 y 3.6VDC (3.3V es el valor óptimo), y consume solamente 400µA de corriente.

- **USB-6008: Dispositivo de E/S Multifunción**

Dispositivo USB de E/S Multifunción, 8 AI (12 Bits, 100 kS/s), 2 AO (150 S/s), 12 DIO— El USB-6008 es un dispositivo DAQ multifunción de bajo costo. Ofrece E/S analógicas, E/S digitales y un contador de 32 bits. El USB-6008 brinda funcionalidad básica para aplicaciones como registro de datos simple, medidas portátiles y experimentos académicos de laboratorio.

El dispositivo tiene una cubierta mecánica ligera y es energizado por bus para fácil portabilidad. Puede conectar fácilmente sensores y señales al USB-6008 con conectividad de terminal de tornillo. El controlador NI-DAQmx y la utilidad de configuración incluidos simplifican la configuración y las medidas.

- **Cámara de Alta velocidad**

Dispositivo encargado de adquirir datos mediante el análisis de imágenes obtenidas en alta velocidad, permitiendo analizar cualidades como posición, velocidad y aceleración.

### **1.6.3. Componentes del Sistema de Control**

#### **1.6.3.1. Unidad de control**

Se encargará de la administración de los actuadores de acuerdo con determinados parámetros y la decodificación de la información tomada por los sensores.

#### **1.6.3.2. Interfaz de control y monitoreo (HMI)**

Para poder manipular, configurar u ejecutar las acciones de la máquina es necesario una interfaz de comunicación entre el usuario y el equipo, la misma debe presentar la información adquirida por los sensores.

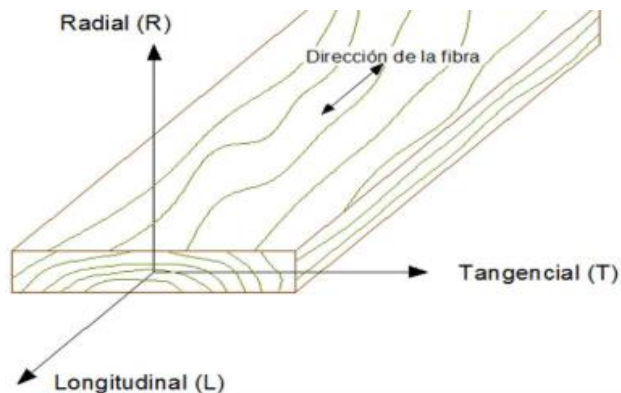
## CAPÍTULO II

### ESTADO DEL ARTE

#### 2.1. Propiedades Elásticas de los Materiales

La madera se puede tratar como un material ortotrópico; por lo cual tiene propiedades mecánicas únicas en las direcciones de los tres ejes perpendiculares: longitudinal, radial, y tangencial como se observa en la Figura 3 (Green, Winandy, & David, 1999).

Para describir el comportamiento elástico de la madera, hacen falta 12 constantes, de los cuales 9 son independientes, que son 3 módulos de elasticidad  $E$ , 3 módulos de rigidez  $G$  y 6 coeficientes de Poisson (Green, Winandy, & David, 1999).



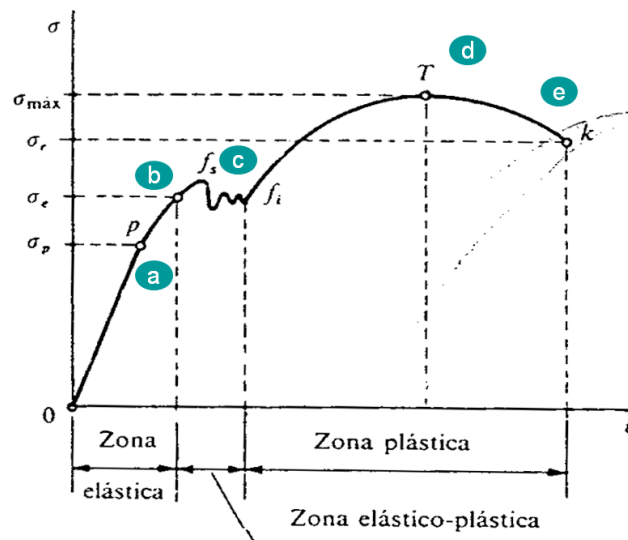
**Figura 3.** Madera como material ortotrópico, disposición de sus 3 ejes.

*Fuente: (Salazar, 2007)*

### 2.1.1 Módulo de Elasticidad

El módulo de elasticidad describe la rigidez relativa de un material. Se mide por la pendiente en la zona elástica de la curva esfuerzo-deformación, el mismo implica que las deformaciones producidas en el rango elástico de la curva, son recuperables después de eliminar la tensión, tomando en cuenta que al superar el rango elástico se produce una deformación plástica como se observa en la Figura 4 (Salazar, 2007).

Para determinar el comportamiento de la madera, los tres módulos de elasticidad se denotan por  $E_r$ ,  $E_l$  y  $E_t$ , los mismos son los módulos de elasticidad Radial, Longitudinal y Tangencial respectivamente, estos módulos se obtienen generalmente por ensayos de compresión, sin embargo para los módulos de elasticidad Radial y Tangencial los datos no son extensos (Green, Winandy, & David, 1999).



**Figura 4.** Curva Esfuerzo Deformación.  
Fuente: (Green, Winandy, & David, 1999)



Se diferencia la resistencia de materiales obtenida de forma teórica como de forma experimental

### **2.1.2. Resistencia de Materiales Teórica**

Para obtener la resistencia de forma teórica, se realiza el estudio principalmente basándose en 2 factores, primero los diferentes modelos matemáticos que rigen el fenómeno físico y los diferentes esfuerzos generados dentro del material por las fuerzas aplicadas (Salazar, 2007).

### **2.1.3. Resistencia de Materiales Experimental**

Para calcular experimentalmente, se realiza ensayos en laboratorio de probetas del material a analizar, sometiendo dicho material a diferentes tipos de cargas, de esta manera encontrando los esfuerzos a los que resisten las probetas, además se determina las diferentes deformaciones producidas en el mismo, con diferentes métodos de estudio, teniendo como fin encontrar las relaciones entre los esfuerzos aplicados y las deformaciones con las que se determina las características acción-respuesta de los materiales, hallando diferentes parámetros como los módulos de elasticidad y de corte (Salazar, 2007).

## **2.2 Módulo de Elasticidad Estático y Dinámico**

Entre los estudios realizados sobre la caracterización de materiales encontrando el módulo de elasticidad estático y dinámico se destacan 2 principalmente, primero el trabajo realizado por J. Sabbagh, que tiene como objetivo evaluar y comparar el módulo

de elasticidad hallado por métodos dinámicos y estáticos en 34 materiales basados en resinas (Sabbagh, Vreven, & Leloup, 2001).

El ensayo principalmente consistió en realizar las pruebas a 34 elementos con diferentes características, para las 2 pruebas, 5 elementos con forma de barra con las siguientes dimensiones (25x2x2) fueron preparados en moldes metálicos, para después ser cubiertos por una tira de plástico y una cubierta de vidrio, finalmente los moldes fueron almacenados en agua destilada a una determinada temperatura por 1 día, 7 días, 28 días y 180 días, las dimensiones de cada probeta fueron medidas antes de realizar las pruebas (Sabbagh, Vreven, & Leloup, 2001).

Para hallar el módulo de elasticidad dinámico, de manera no destructiva, se utilizó una técnica de impulso excitación, que consiste en que cada muestra es sometida a vibración por un impulso mecánico de luz, la señal producida es captada por un micrófono ubicado en la base de las muestras y analizado por un procesador de señales (Grindosonic Figura5), la frecuencia fundamental a flexión se muestra en la pantalla del procesador para calcular finalmente el MOE dinámico con la siguiente fórmula (Sabbagh, Vreven, & Leloup, 2001):

$$MOEd = 0.9465(mf^2/b)(L^3/t^3)T \quad (3)$$



**Figura 5.** Máquina de Ensayos no destructivos Grindosonic MK7.  
Recuperado de: <http://www.penntoolco.com/grindosonic/>

Donde el valor de  $f$ , corresponde a la frecuencia fundamental del sistema y el resto de valores, a las medidas físicas de las muestras, como se observa en base a la frecuencia fundamental hallada por un ensayo no destructivo se obtiene el parámetro del MOE dinámico.

Para obtener el MOE estático, se determinó con la prueba de flexión en 3 puntos acorde a la norma ISO 4049, las muestras fueron colocadas en una máquina de ensayos a tensión, de donde se determinó el MOE estático con la siguiente fórmula teórica (Sabbagh, Vreven, & Leloup, 2001):

$$MOEd = (Fl^3/4bdh^3) \quad (4)$$

Los factores de esta fórmula son principalmente la carga  $F$ , el ancho, el espesor y la deflexión.

El segundo estudio es el realizado por Pascal Nzokou (Relationship between non destructive and static modulus of elasticity of commercial wood plastic composites), el estudio consistió en obtener el módulo de elasticidad dinámico por ensayos no destructivos y el módulo estático, con el fin de ver el potencial del uso de ensayos no destructivos en compuestos plástico-madera, para realizar las pruebas, se utilizaron 12 elementos de madera plástico de 2.4 m de longitud (Nzokou, 2005).

Para encontrar el MOE dinámico, se utilizó la técnica de vibración transversal, monitoreado por un osciloscopio y un acelerómetro, el material se estimula con vibración transversal utilizando un martillo, la frecuencia de vibración es monitoreada (Metriguard Model 340 Figura 4), encontrando la frecuencia natural y el MOE con la siguiente fórmula (Nzokou, 2005):

$$MOE = \frac{f^2 WL^3}{2.46lg} \quad (5)$$

Donde f es la frecuencia natural del sistema, L la frecuencia de muestreo, I la inercia y g el valor de la gravedad, nuevamente se observa la obtención del MOE dinámico con ensayos no destructivos, ara la determinación del MOE estático, se utilizó la prueba de flexión a 4 puntos, en una máquina de ensayos universales, acorde a la norma ASTM D6109.



**Figura 6.** Banco de Ensayos no destructivos Metriguard 340 E Computer.  
*Recuperado de: <https://metriguard.com/product/340-e-computer>*

Como se observa en las figuras, existen algunos métodos de ensayos no destructivos utilizados para la determinación del módulo de elasticidad dinámico, siendo un conjunto de componentes mecánicos con procesadores y sensores.

### **2.3 Ensayos no Destructivos en Madera**

La madera es un material extremadamente valioso al ser ampliamente distribuido y requerir relativamente pequeñas cantidades de energía para procesarse en productos útiles, como consecuencia, la madera ha sido utilizada durante siglos tanto para vivienda como de materia prima industrial (Ross, 2015).

Es importante tener en cuenta que la madera es un material de origen biológico, en consecuencia, su composición molecular y su estructura fisiológica básica están fijadas por la naturaleza. El hecho de que es un material biológico, proporciona la base para

muchas de sus propiedades únicas, lo que se transforma en un desafío para los constructores y usuarios (Ross, 2015).

Algunas de las características son las nombradas a continuación:

- La madera es un material fibroso
- Es un material químico complejo
- Es Anisotrópica (variación de características según la dirección en que se examina)
- Es Viscoelástica (comportamiento reológico propiedades viscosas y elásticas al deformarse)
- Es Higroscópica (capacidad de absorber humedad en el medio circundante)
- Es variable (de una especie a otra, varía significativamente sus propiedades)
- En su estado sólido original, es muy adecuada para diferentes aplicaciones

Los ensayos no destructivos se utilizan para la identificación de propiedades físicas y mecánicas de una muestra de material sin alterar sus capacidades de uso final y posterior estudio de esta información para toma de decisiones con respecto a la adecuada aplicación.

Dichos ensayos se basan en tecnologías no destructivas de prueba para proporcionar información precisa, principalmente enfocado en las propiedades, rendimiento y estado del material.

### **2.3.1. Ensayos no Destructivos (Estático a Flexión)**

La medición del módulo de elasticidad (MOE) por métodos de flexión estática, es un procedimiento que implica el uso de la relación de carga-deflexión de una viga apoyada en diferentes configuraciones. El módulo de elasticidad puede ser calculado directamente mediante el uso de ecuaciones derivadas de la mecánica de materiales. (Ross, 2015)

### **2.3.2. Técnicas de Vibración transversal**

Consiste principalmente en realizar un estímulo al material debido a un impacto para medir su respuesta dinámica, está considerablemente influenciada por las condiciones del entorno, se puede trazar una analogía entre una masa influenciada a un resorte de peso despreciable y el comportamiento vibracional de una barra, un factor muy importante en este tipo de ensayos es la frecuencia natural (Sanite, 2015).

### **2.3.3 Métodos de Ultrasonido**

Se aplican esencialmente en los procedimientos de transmisión o pulso eco, utilizándose muy ampliamente aquellos que consisten en dos transductores, uno emisor y otro receptor que, perfectamente acoplados a la madera, miden el tiempo que tarda la onda ultrasónica en llegar de uno a otro, con el fin de cuantificar los complicados patrones de granos para su posterior procesamiento, medir el módulo de elasticidad en muestras de tamaño completo, entre otros. (Sanite, 2015).

### **2.3.4 Métodos Acústicos**

Se utilizan técnicas acústicas, teniendo principalmente como herramienta las propiedades acústicas a través del material, este método se basa principalmente en que la velocidad de onda decrece al aumentar los defectos en tamaño y número, permitiendo así poder establecer velocidades críticas entre calidades de especies de madera (Sanite, 2015).

### **2.3.5 Espectro visible**

La radiación en el espectro ultravioleta tiene aplicabilidad en el estudio de la microestructura de la madera. Los rayos X se han utilizado para encontrar la degradación en la microestructura de las muestras. Los rayos gamma también se utilizan como detectores de humedad, permitiendo medir efectivamente la humedad de la misma (Ross, 2015).

### **2.3.6. Método de Conductividad (Propiedades Eléctricas)**

La conductividad se utiliza para medir el porcentaje de humedad dentro del material, principalmente al ser proporcional a la humedad e independiente de la densidad. Los métodos piezoeléctricos también adquieren su importancia, consisten principalmente a excitar la muestra con un voltaje piezoeléctrico y estimulando la misma, se determinan variaciones en las propiedades de elasticidad, muy adecuado para aplicaciones críticas donde se pueda utilizar madera.



## 2.4. Transformada de Fourier

La transformada Fourier de una señal unidimensional o función continua, es una transformación de dicha señal que permite calcular la contribución de cada valor de frecuencia a la formación de la señal, en otras palabras, es una transformación matemática que permite pasar una señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia tomando en cuenta todos los datos que son parte del fenómeno (Paz, 2009).

Por otro lado, la transformada rápida de Fourier sirve para describir más precisamente el desarrollo de señales periódicas mediante series de senos y cosenos (National Instruments, 2006), que, al superponerse, representan la función, en las siguientes fórmulas se observa la transformada inversa (6) y directa (7) de Fourier

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} dt \quad (6)$$

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (7)$$

## 2.5 Espectro de Frecuencia

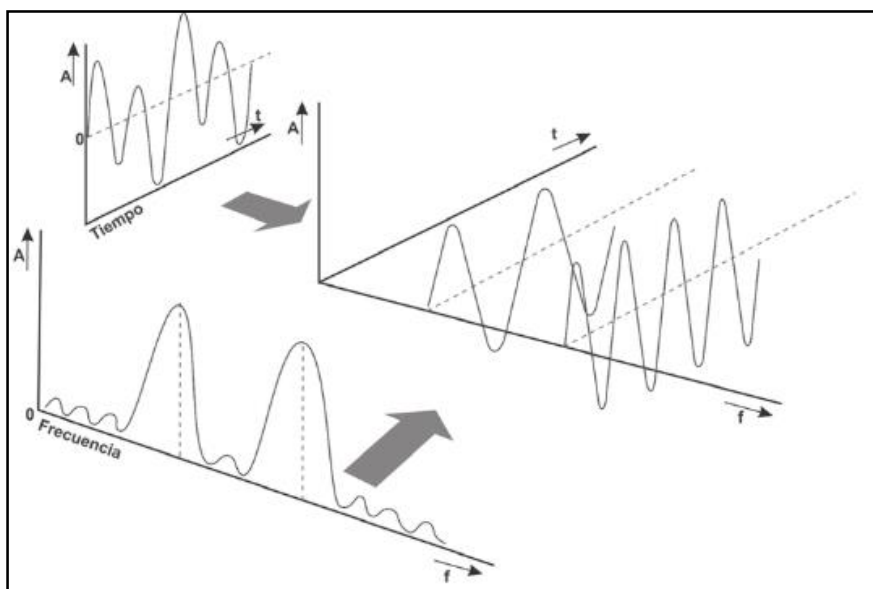
Es la representación de las amplitudes de cada frecuencia dentro de un fenómeno ondulatorio, en muchas ocasiones el dominio del tiempo es complejo de analizar, por lo que el dominio de la frecuencia representa información importante dentro de los fenómenos ondulatorios, permite analizar las señales y el ruido del mismo entre otras.

La Transformada Rápida de Fourier (FFT) proporciona un método para examinar una relación en términos del dominio de frecuencia. El teorema de Fourier afirma que

cualquier forma de onda en el dominio puede ser representada por la suma acumulada de senos y cosenos. Entonces la misma forma de onda puede ser representada en el dominio de frecuencia como un par de valores de amplitud y fase en la frecuencia de cada componente (National Instruments, 2016).

Se puede entender esta representación, como la visualización en 3 dimensiones de un fenómeno de apariencia unidimensional, un fenómeno ondulatorio posee  $n$  variaciones dentro del mismo en el transcurso del tiempo, por lo que al analizar en la frecuencia, podemos encontrar específicamente las variaciones producidas dentro del mismo, teniendo un conjunto casi infinito de vibraciones dentro de un mismo fenómeno, de esta manera cuando se suma un número infinito de ondas senoidales con amplitudes diferentes, se puede medir la densidad de frecuencias, la cual será más alta alrededor de unas frecuencias que de otras, en la figura se observa la relación entre la gráfica del tiempo y el espectro de frecuencia que describe la misma.

Como parte del ensayo del presente proyecto, el objetivo final es la obtención del espectro de frecuencias, al obtener previamente la excitación en el dominio del tiempo, para llegar al valor de la frecuencia natural, es indispensable aplicar la transformada de Fourier y por ende encontrar la gráfica del espectro de frecuencias.



**Figura 7.** Relación de fenómeno ondulatorio entre el dominio del tiempo y el dominio de la frecuencia.

*Fuente: (National Instruments, 2016)*

## **CAPÍTULO III**

### **EXPERIMENTACIÓN**

Para el desarrollo del presente capítulo, se utilizará la metodología del diseño concurrente, que se refiere principalmente a la integración del diseño del producto con los procesos necesarios para fabricarlo, teniendo en cuenta algunos factores importantes dentro del mismo, se utilizará como herramienta la matriz QFD, que se basa principalmente en que necesita y espera el usuario además de cómo se obtienen dichos resultados, finalmente se desarrollará los subsistemas correspondientes al diseño mecánico, electrónico y control.

#### **3.1. Metodología del Diseño**

##### **3.1.1 Definición de Necesidades**

En la tabla 1, se observan las características finales que debe tener el diseño del equipo, teniendo como prioridad su correcto funcionamiento, que sea económico y que sea posible realizarlo con los recursos disponibles en nuestro medio.

Para realizar la casa de calidad, se toma en cuenta los listados vistos anteriormente respecto de las necesidades y las características técnicas, con un criterio de QUE, y COMO se va a realizar el proyecto respectivamente, obteniendo finalmente una calificación en base a una ponderación previamente establecida (Gomez, 2018).

**Tabla 1***Necesidades de diseño*

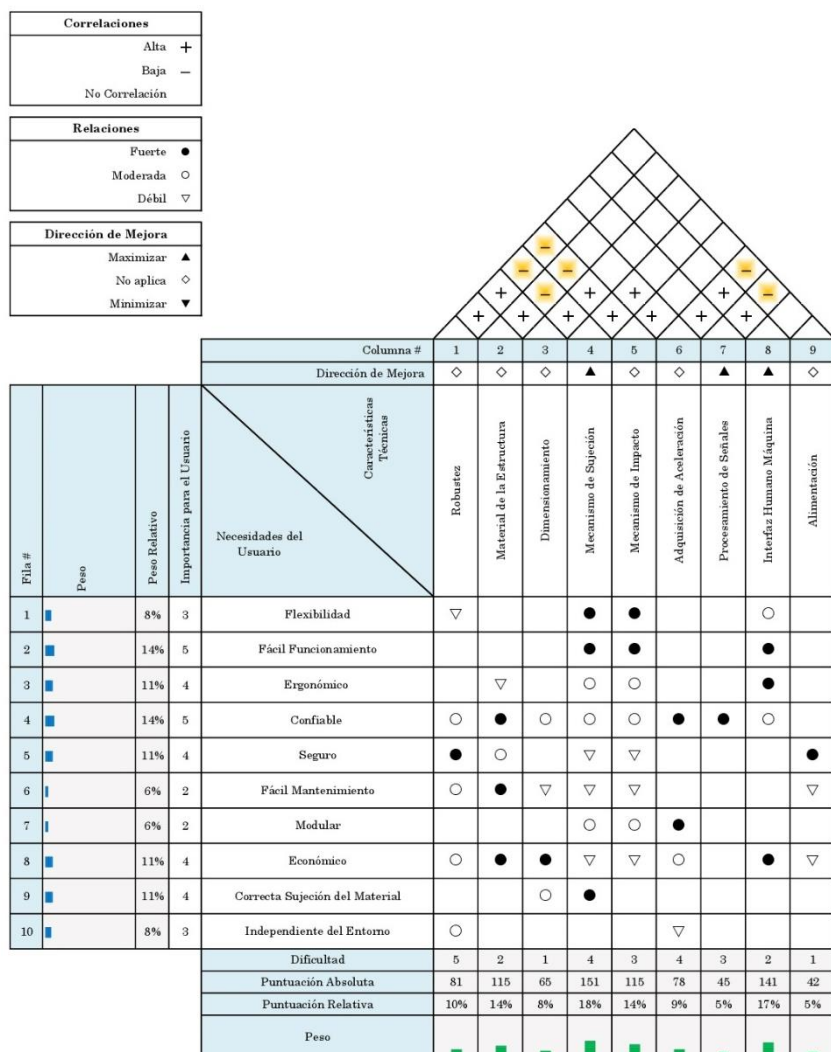
No.	Requerimientos
1	Flexibilidad
2	Fácil funcionamiento
3	Ergonómico
4	Confiable
5	Seguro
6	Fácil mantenimiento
7	Modular
8	Económico
9	Correcta Sujeción de material
10	Independiente del Entorno

**3.1.2. Características Técnicas**

Son las características de ingeniería del producto, se refleja las necesidades del usuario en especificaciones técnicas, en la tabla 2 se observa las principales

**Tabla 2***Características técnicas del diseño*

No.	Características
1	Robustez
2	Material de la Estructura
3	Dimensionamiento
4	Mecanismo de Sujeción
5	Mecanismo de Impacto
6	Adquisición de Aceleración
7	Procesamiento de Señales
8	Interfaz Humano Máquina
9	Alimentación



**Figura 8.** Casa de la Calidad correspondiente al proyecto

En base a la matriz desarrollada en la Figura 8, se obtienen los resultados de la matriz QFD mostrados en la siguiente tabla 3

**Tabla 3**  
*Resultados de matriz de calidad*

No.	Característica Técnica	Porcentaje
1	Mecanismo de Sujeción	18%
2	Interfaz Humano Máquina	17%
3	Mecanismo de Impacto	14%
4	Material de la Estructura	14%
5	Robustez	10%
6	Adquisición de Aceleración	9%
7	Dimensionamiento	8%
8	Procesamiento de Señales	5%
9	Alimentación	5%

En función de los valores adquiridos en la tabla, se ha adquirido un promedio de valores de 11.1, por lo cual se tomará mayor atención en las características superiores a este valor.

- **Mecanismo de Sujeción**

Este factor es importante, debido a que una correcta sujeción de la probeta, minimiza las perturbaciones del medio durante la realización del ensayo.

- **Interfaz Humano Máquina**

Una HMI clara y sencilla, facilita la adquisición de datos de los acelerómetros y el procesamiento de los mismos.

- **Mecanismo de Impacto**

La aplicación adecuada de una fuerza durante el ensayo, garantiza el correcto funcionamiento del equipo y la fiabilidad de los datos obtenidos

- **Material de la Estructura**

La selección adecuada del material del cual estará conformado la estructura, permite determinar los límites mecánicos en los cuales se ejecutará el ensayo

### **3.2. Subsistema Mecánico**

Basado en la metodología de la casa de la calidad, los puntos más importantes en el análisis dentro de la experimentación serían el Mecanismo de Sujeción, Mecanismo de Impacto y el desarrollo de la estructura dentro del subsistema Mecánico, los cuáles se desarrollarán a continuación.

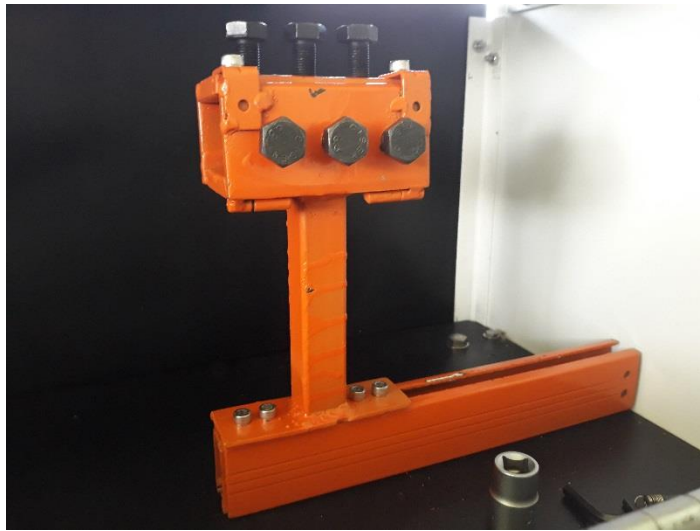
#### **3.2.1. Mecanismo de Sujeción**

Para la sujeción del material para analizar, se desarrolló un sistema de tornillo de banco, el cual tiene como propósito principalmente el empotramiento del material dentro del ensayo y el limitante del mismo en los 3 ejes, esto a futuro facilitara la correcta adquisición de datos dentro del ensayo.



Como se observa en la Figura 9, el sistema está compuesto de 2 elementos principales:

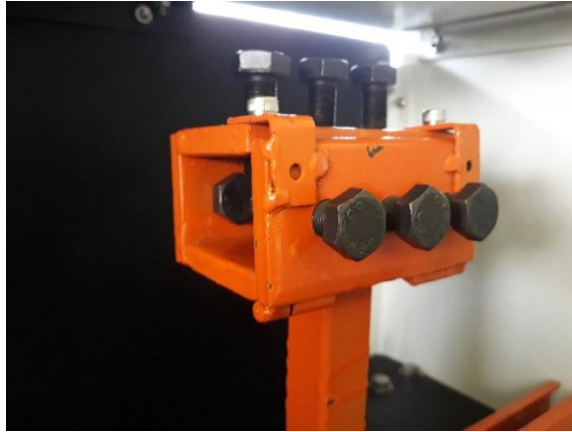
- Elemento de Sujeción
- Elemento de Desplazamiento



**Figura 9.** Mecanismo de sujeción y desplazamiento

### **Elemento de Sujeción**

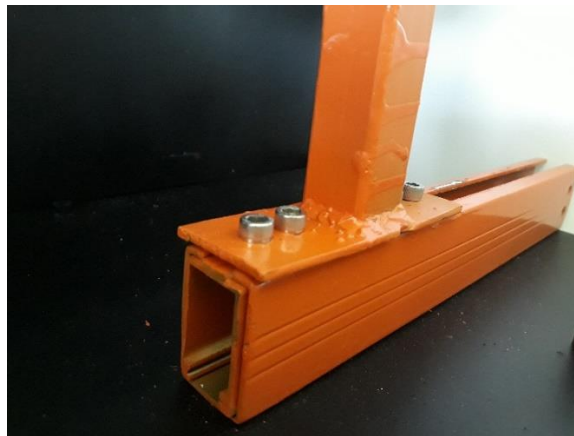
El elemento de sujeción está compuesto por 4 placas de 100 x 50 x 10 mm, las cuales se encuentran distribuidas de tal manera que condicionen la ubicación de probetas en un rango de 50x50 mm a 25 x 25 mm de sección como se observa en la Figura 10, para limitar el movimiento del material, se utilizaron 9 tornillos de sujeción de 12 mm, distribuidos en las caras laterales y superior del elemento



**Figura 10.** Elemento de Sujeción

### **Elemento de Desplazamiento**

Está compuesto por una corredera de 250 mm de longitud, la cual provee un rango de dimensión de probetas entre 1000 mm y 750 mm, con correcciones posteriores entre 0 y 250 mm, la cual se encuentra empernada a la base de la estructura como se observa en la Figura 11.



**Figura 11.** Elemento de desplazamiento

### 3.2.2. Mecanismo de Impacto

Se encuentra conformado por un mango superior con un eje, el cual proporciona el impacto inicial necesario para el ensayo, el mismo se encuentra empernado en la parte superior de la máquina, a 2 distancias, la primera permite realizar el impacto a probetas en el rango de 1000 a 750 mm y la segunda a probetas de hasta 250 mm, al final del eje, se encuentra una superficie de impacto, necesaria para no realizar ningún daño al material, como se observa en la Figura 12.



**Figura 12.** Mecanismo de Impacto

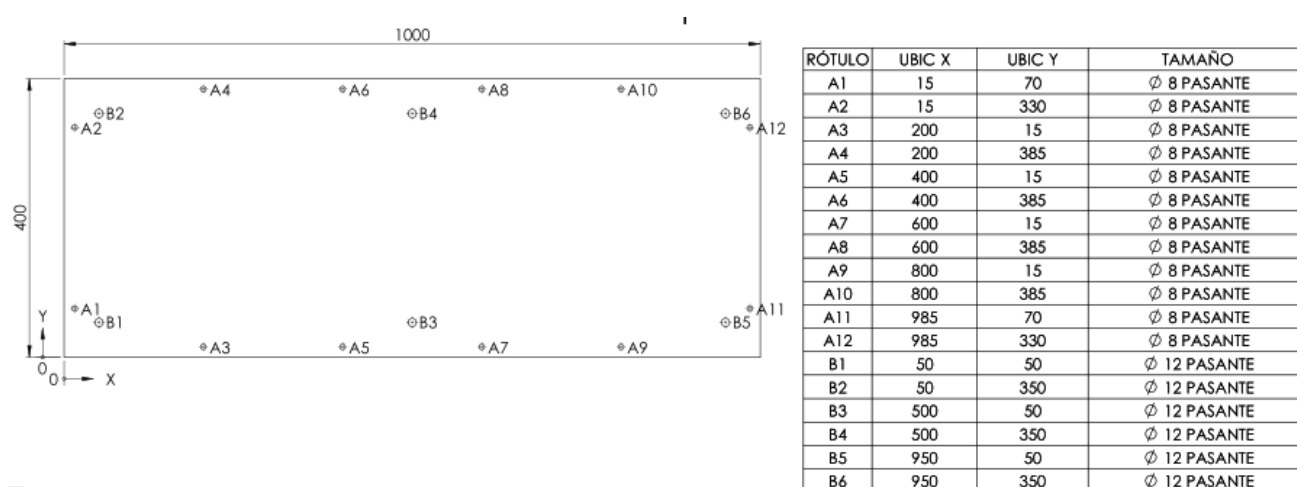
### 3.2.3. Construcción de la Estructura

La estructura sobre la cual se montan los sensores acelerómetros, mecanismo de impacto, mecanismo de agarre y tarjetas de adquisición de datos debe ser estable, capaz

de evitar posibles interferencias exteriores durante el ensayo y brindar seguridad en caso de ruptura de las probetas al usuario.

La estructura principal de la maquina consiste en una cámara de ensayos construida a partir de 6 placas de acero, las cuales permanecen unidas mediante juntas pernadas, brindando un entorno libre de interferencias del medio exterior y facilitando la adquisición de datos con los acelerómetros y posterior análisis de imagen con la cámara de alta velocidad.

El proceso de manufactura de la estructura requiere el cálculo de fuerzas y velocidades de corte para los agujeros realizadas en dichas planchas.



**Figura 13.** Ubicación y detalle de los agujeros a realizarse

### Parámetros básicos de una operación de taladro

V<sub>c</sub>: Velocidad de corte (m/min)

$$V_c = \frac{\pi DN}{1000} \quad (8)$$

V<sub>c</sub>: Velocidad de corte (m/min)

D: Diámetro de la broca (mm)

N: Velocidad de rotación (rpm)

V<sub>f</sub>: Velocidad de avance (mm/min)

$$V_f = N * f \quad (9)$$

N: Numero de revoluciones

f: Avance

f<sub>z</sub>: Avance por filo (mm/diente)

$$f_z = \frac{V_f}{z * N} \quad (10)$$

f<sub>z</sub>: Avance (mm/diente)

V<sub>f</sub>: Velocidad de avance (mm/min)

z: Numero de filos

N: Velocidad de rotación (rpm)

S<sub>c</sub>: Sección de viruta (mm<sup>2</sup>)

$$S_c = f_z * \left(\frac{D}{2}\right) \quad (11)$$

S<sub>c</sub>: Sección de viruta (mm<sup>2</sup>)

Fz: Avance por filo (mm)

D: Diámetro de la broca (mm)

Fc: Fuerza de corte (N)

$$F_c = p_s * S_c \quad (12)$$

ps: Energía específica de corte (N/mm<sup>2</sup>)

Sc: Sección de viruta (mm<sup>2</sup>)

Pc: Potencia de corte (W)

$$P_c = \frac{z * F_c * \left(\frac{V_c}{2}\right)}{60} \quad (12)$$

Z: Número de filos

Pc: Potencia de corte (W)

Fc: Fuerza de corte (N)

Vc: Velocidad de corte (m/min)

Todos los parámetros de corte deben estar representados en su respectiva hoja de procesos, utilizando los resultados obtenidos de las fórmulas 8, 9,10,11,12 y 13, se obtuvieron los valores para completar la hoja de procesos de la Figura 12.

Hoja de proceso				Hoja N°: 1	
Conjunto: Equipo de adquisición de datos		Pieza: Tapa lateral		Material: Acero	
Subconjunto: Base y estructura de protección		Número de pieza: 01		Autor: Lopez C. – Ortuno F.	

N° de Fase	Subfase	Operación	Descripción	Herramientas, Apar. de control	Condiciones de corte				
					V (ft/min)	N (rpm)	fr (in/rev)	f (in/min)	f (mm/min)
1		1 Taladro 1/8"	8 Agujeros estructura	Broca 1/8"	80.00	2444.62	0.002	4.89	124.19
		2 Taladro 1/4"	8 Agujeros estructura	Broca 1/4"	80.00	1222.31	0.002	2.44	62.09
2		1 Taladro 1/8"	2 Agujeros sistema de martillo	Broca 1/8"	80.00	2444.62	0.002	4.89	124.19
		2 Taladro 1/4"	2 Agujeros sistema de martillo	Broca 1/4"	80.00	1222.31	0.002	2.44	62.09
		3 Taladro 3/8"	2 Agujeros sistema de martillo	Broca 3/8"	80.00	814.87	0.004	3.26	82.79
		4 Taladro 1/2"	2 Agujeros sistema de martillo	Broca 1/2"	80.00	611.15	0.004	2.44	62.09
3		1 Taladro 6mm	6 Agujeros soportes niveladores	Broca expansora 6mm	80.00	2444.62	0.002	4.89	124.19
		2 Taladro 8mm	6 Agujeros soportes niveladores	Broca expansora 8mm	80.00	873.08	0.004	3.49	88.70
		3 Taladro 10mm	6 Agujeros soportes niveladores	Broca expansora 10mm	80.00	763.94	0.004	3.06	77.62

**Figura 14.** Parámetros de corte

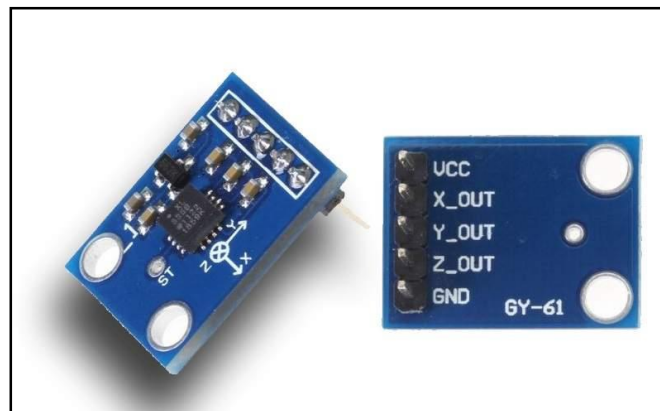
### 3.3. Subsistema Electrónico

Para realizar la caracterización, se necesita encontrar la frecuencia natural del sistema, por lo que se va a utilizar sensores que permitan determinar dicha frecuencia por medio de la aceleración, se tendrá en cuenta 2 procesamientos posteriores, primero el análisis de frecuencia con un sensor analógico y posteriormente el monitoreo con un sensor digital.

#### 3.3.1. Sistema Analógico

Para la primera parte el sensor que se utilizará es el ADXL335 (Figura 13), el cual es un sensor de 3 grados de libertad, con este sensor se puede medir aceleración dinámica, es decir, la producida por movimiento, choque o vibración, el sensor posee las siguientes características técnicas extraídas del datasheet del mismo (Digikey, 2012)

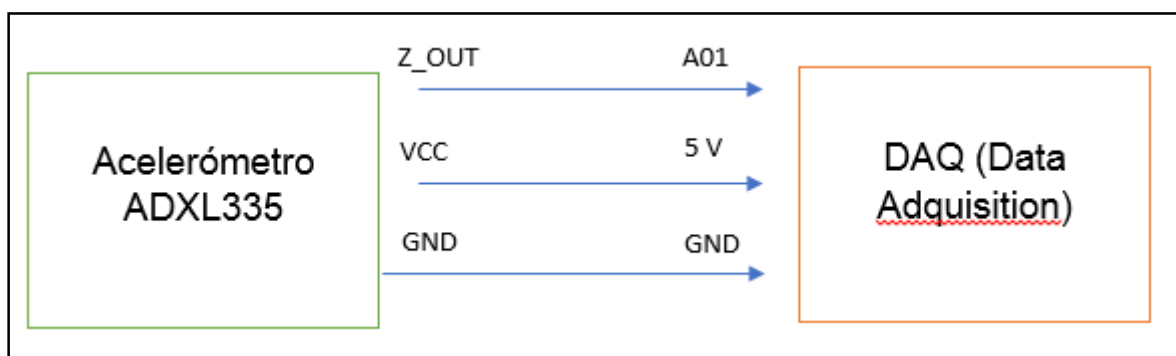
- Detección de 3 ejes
- Paquete pequeño de bajo perfil: LFCSP de 4 mm x 4 mm x 1.45 mm
- Baja potencia: típica de 350  $\mu$ A
- Funcionamiento de alimentación simple: 1.8 V a 3.6 V
- Supervivencia de choque de 10.000 g
- Excelente estabilidad térmica



**Figura 15.** Sensor ADXL335  
*Fuente: (Digikey, 2012)*

Como se observa en la Figura 15, el sensor tiene un esquema de conexión sencillo de utilizar, consta de 3 pines de lectura de datos (X,Y,Z), correspondientes al voltaje de salida de cada eje y los pines de alimentación y tierra (VCC,GND), en la Figura 14, se observa la conexión que se realizará entre el sensor y la tarjeta de adquisición de datos que se explicará posteriormente





**Figura 16.** Diagrama de conexión del acelerómetro ADXL335 con tarjeta de adquisición

Es necesario linealizar el sensor para las condiciones de funcionamiento, es decir realizar la adquisición de datos en tiempo real del sensor (tabla 4) y obtener la ecuación característica del mismo, para ello se utilizará la ecuación punto pendiente de la recta, en base a los datos obtenido

**Tabla 4**

*Valores de gravedad vs voltaje*

Valor (gravedad)	Voltaje (Eje Z)
1	1.80
0	1.50
-1	1.19

$$y - y_1 = m(x - x_1)$$

$$y - 1 = \frac{1 - 0}{1.80 - 1.50} (x - 1.80)$$

$$y - 1 = 3.33(x - 1.80)$$

$$y(\text{gravedad}) = 3.33x(\text{voltaje}) - 5 \quad (8)$$

Como se observa, la ecuación es la característica del sistema a utilizar teniendo la gravedad en función del voltaje.

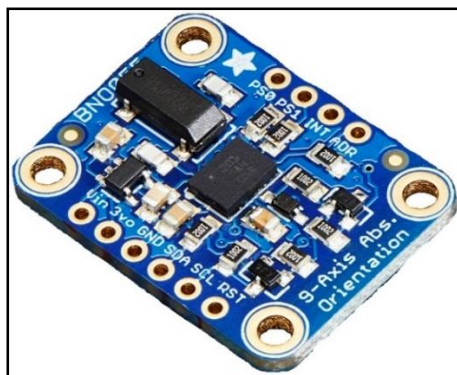
### 3.3.2 Sistema Digital

Para la obtención digital de los datos de aceleración, se utilizará el sensor BNO055 de Adafruit (Figura 15), el BNO055 es un sensor que incluye todos los sensores necesarios con compensación de temperatura, así como un microcontrolador ARM Cortex-M0 que procesa y realiza todos los cálculos matemáticos.

Las salidas de datos que dicho sensor tiene son las siguientes (Townsend, 2018):

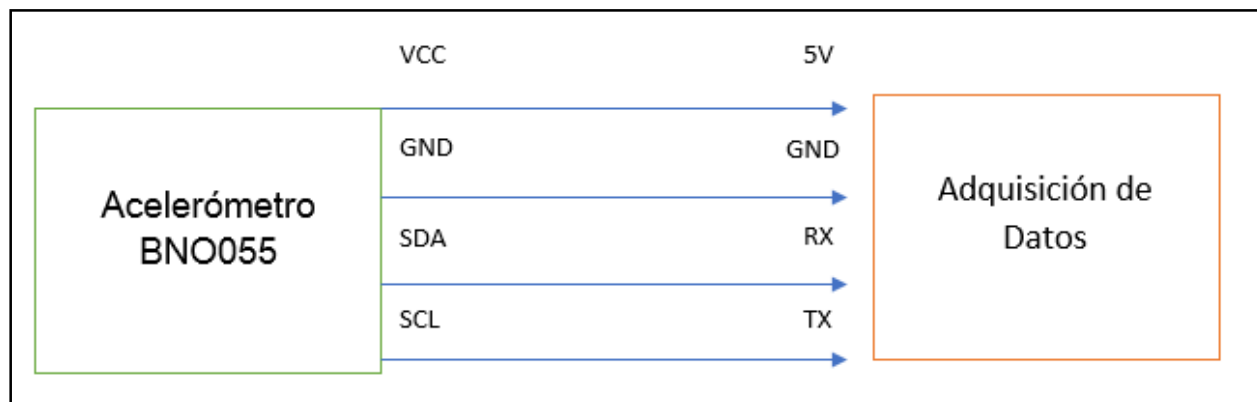
- **Orientación Absoluta** (Vector de Euler, 100Hz) Datos de orientación de tres ejes basados en una esfera de 360 °.
- **Orientación Absoluta** (Cuaterno, 100Hz) Cuaterno de cuatro puntos para una manipulación de datos más precisa
- **Vector Velocidad Angular** (100Hz) Tres ejes de velocidad de rotación en rad / s
- **Vector Aceleración** (100Hz) Tres ejes de aceleración (gravedad + movimiento lineal) en m/s<sup>2</sup>
- **Vector de fuerza de campo magnético** (20Hz) Tres ejes de detección de campo magnético en micro Tesla (uT)
- **Vector de Aceleración Lineal** (100Hz) Tres ejes de datos de aceleración lineal (aceleración menos gravedad) en m/s<sup>2</sup>
- **Vector Gravedad** (100Hz) Tres ejes de aceleración gravitacional (menos cualquier movimiento) en m/s<sup>2</sup>

- **Temperatura (1Hz)** Temperatura ambiente en grados centígrados



**Figura 17.** Sensor BNO 055 Adafruit  
Fuente: (Townsend, 2018)

Como se observa en la Figura 16, las conexiones básicas para la utilización del sensor son la alimentación, tierra, pin de datos y señal de reloj, la señal de datos se encarga de enviar directamente el valor de cada variable (aceleración) a la interfaz de usuario, en la figura se observa la conexión del sensor con la tarjeta de adquisición.



**Figura 18.** Diagrama de conexión Sensor BNO055 con procesador

Al analizar el siguiente subsistema, se observará el procesamiento posterior de los datos obtenidos y su correspondiente control y monitoreo en base a los sensores observados en este apartado.

### **3.4. Subsistema de Control**

En el siguiente punto, se observará las diferentes tarjetas de procesamiento utilizadas en la máquina, inicialmente para el procesamiento analógico y finalmente para el procesamiento digital, además de las HMI utilizadas.

En un punto final, se analizará acerca del sistema de validación propuesto, mediante una cámara de alta velocidad.

#### **3.4.1. Tarjeta de Adquisición de Datos (DAQ)**

El USB-6008 es un dispositivo DAQ multifunción. Ofrece E/S analógicas, E/S digitales y un contador de 32 bits. El USB-6008 brinda funcionalidad básica para aplicaciones como registro de datos simple, medidas portátiles y experimentos de laboratorio. El dispositivo tiene una cubierta mecánica ligera y es energizado por bus para fácil portabilidad. Puede conectar fácilmente sensores y señales al USB-6008 con conectividad de terminal de tornillo. El controlador NI-DAQmx y la utilidad de configuración incluidos simplifican la configuración y las medidas (National Instruments, 2016).



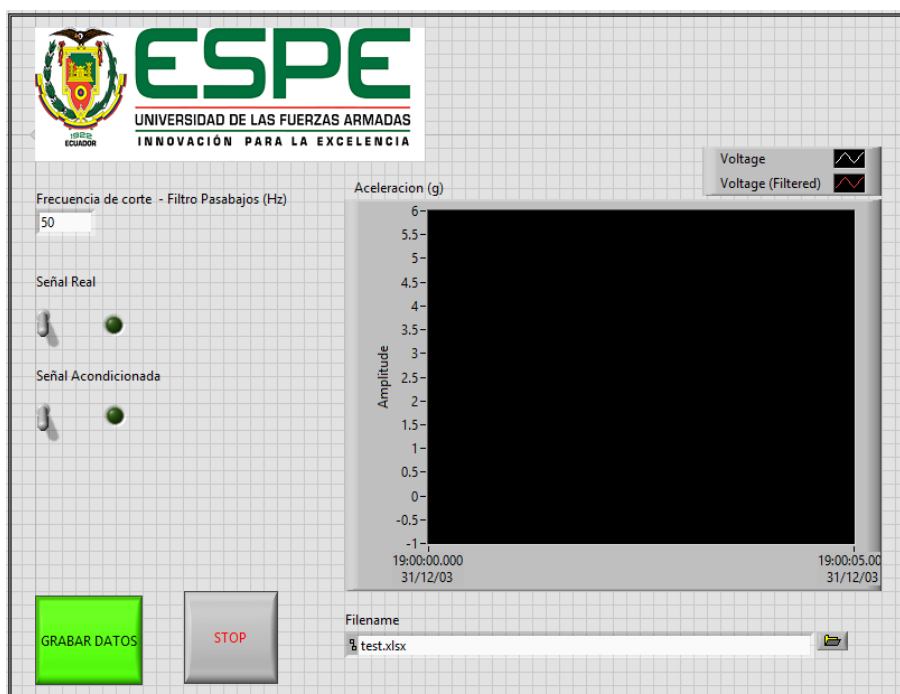
**Figura 19.** Tarjeta de Adquisición de datos National Instruments

*Fuente: (National Instruments, 2016)*

Para la adquisición de datos, se utilizará una de las entradas analógicas de la tarjeta, mediante la cual se obtendrá el valor de la aceleración y posteriormente se monitoreará en LabVIEW

- **Interfaz Humano Máquina**

La HMI utilizada será la observada en la Figura 18, básicamente consta de una pantalla de monitoreo del sistema, en la cual se observa el desempeño del ensayo, además consta de un botón de inicio del proceso, de fin del mismo en función de los requerimientos y parámetros de filtrado, posteriormente se almacenan los datos en un histórico, el cual se procesará en Matlab.



**Figura 20.** Interfaz Humano Máquina Realizada en LabView

- **Obtención de Frecuencia**

Para obtener el valor de frecuencia y el posterior análisis del MOE, se utilizará un código realizado en el software Matlab, el cual permite procesar los datos obtenidos anteriormente con funciones matemáticas específicas, en este caso utilizando la transformada rápida de Fourier como se explicó en el capítulo 2, a continuación, se observa el script utilizado.

```

>> senal= A;
N = length(senal);
fs = 500; % muestras por segundo
T=1/fs;
t = (0:N-1)*T;
Y = fft(senal);
P2 = abs(Y/N);
P1 = P2(1:N/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
f = fs*(0:(N/2))/N;
plot(f,P1)
xlim([0 100])
ylim([0 0.6])
title('Espectro de frecuencias ')
xlabel('f (Hz)')
ylabel('Aceleración (g)')
xlswrite('Datos.xlsx',f,'Hoja 1','A2');
xlswrite('Datos.xlsx',P1(2:end),'Hoja 1','A3');|

```

**Figura 21.** Script utilizado para la obtención de la frecuencia

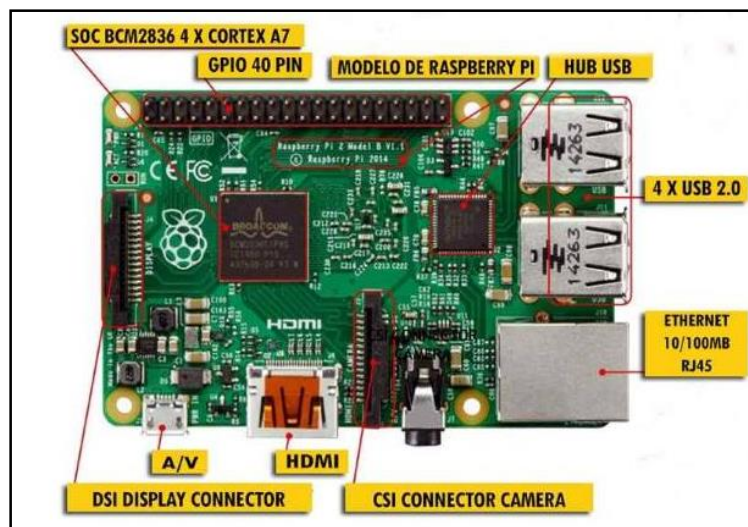
### 3.4.2. Raspberry PI 2

Para la obtención digital de datos, se utilizará la tarjeta Raspberry PI 2, la cual es definida como un micro ordenador, posee las características propias de un computador las cuales se observan a continuación (Raspberry Shop, 2016)

- Procesador de cuatro núcleos Broadcom BCM2836 ARM Cortex-A7
- GPU VideoCore IV doble núcleo con soporte OpenGL ES 2.0, aceleración por hardware OpenVG, 1080p 30 frames, H.264
- 1 GB LPDDR2 SDRAM
- Salida de vídeo 1080p
- Salida vídeo compuesta (PAL / NTSC)

- Salida de audio estéreo
- Ethernet 10/100 Base
- HDMI 1.3 y 1.4
- Audio compuesto jack 3,5 mm
- 4 puertos USB 2.0
- MPI CSI-2
- Socket MicroSD
- Conector Serie
- GPIO 40 pines

En la siguiente figura, se observa las diferentes partes de la Raspberry Pi 2

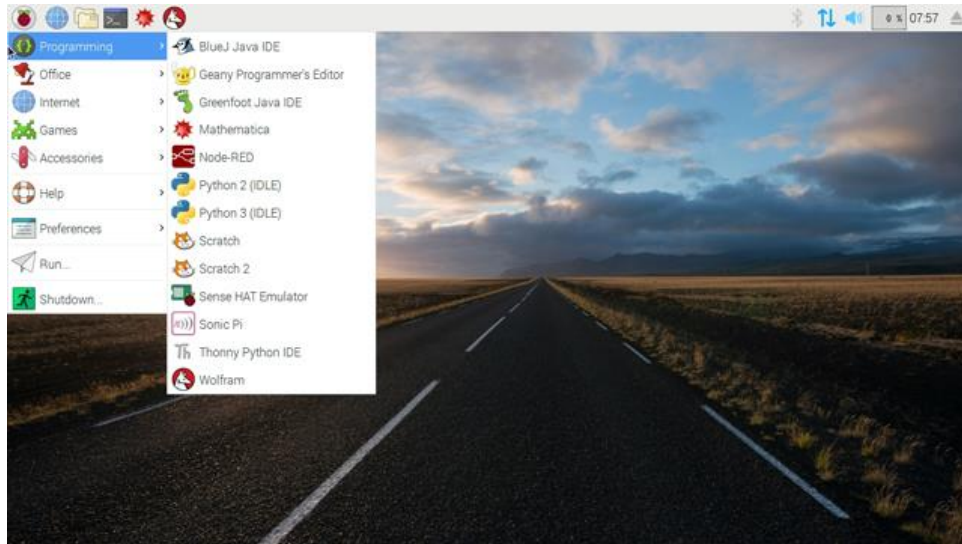


**Figura 22.** Raspberry Pi 2 con sus diferentes componentes  
Fuente: (Raspberry Shop, 2016)

Como se observa en la Figura, dentro del desarrollo del ensayo, la Raspberry Pi queda un sistema autónomo, con su propio monitor, teclado y mouse para manipulación de los



datos, el sistema operativo utilizado para manejar la tarjeta es el Raspbian Lite, el cual se encuentra basado en Linux y permite la operación de la tarjeta, a continuación, se observa la pantalla de inicio del mismo, similar a la que se tiene en Windows.



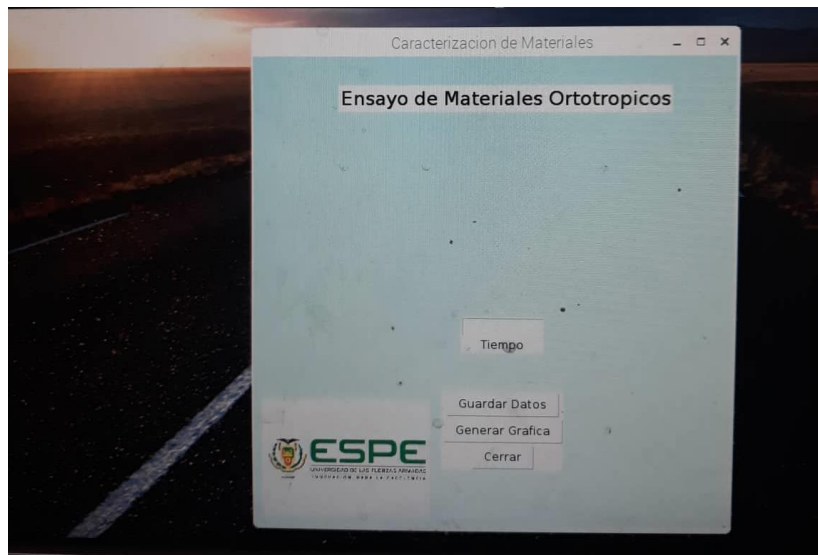
**Figura 23.** Interfaz de inicio del sistema operativo Raspbian

Como se observa en la Figura 20, dentro de los 40 pines de propósito general, se utilizan los pines Rx y Tx los cuales son parte de un protocolo serial asíncrono, que permiten transmitir en línea y recibir los datos del sensor para obtener digitalmente los resultados del mismo

- **Interfaz Humano Máquina**

Por medio de programación en Linux, se obtienen los datos de aceleración del sensor BNO055 , la interfaz tiene una pantalla de monitoreo, junto con un botón de inicio y final del proceso, no hace falta realizar ninguna conversión anterior al tener la

respuesta directa de aceleración, los cuales son guardados en un histórico sirviendo finalmente para su procesamiento y obtención de frecuencia, tomando en cuenta que dichos datos pueden ser extraídos mediante los puertos USB de la tarjeta, una gran ventaja de la Raspberry PI



**Figura 24.** Interfaz Humano Máquina desde sistema operativo Raspbian

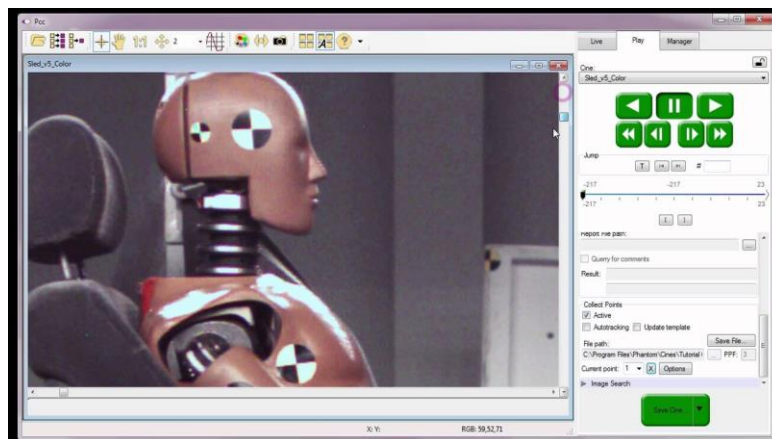
### 3.4.3. Cámara de Alta Velocidad

Posterior a la obtención del módulo de Elasticidad mediante impacto y adquisición de frecuencia, se realizará la validación del sistema con la cámara de alta velocidad PHANTOM V2512 (Figura 23), con la cual se realizará el análisis de movimiento mediante un seguimiento en tiempo real de un punto fijo, en el ejemplo (Figura 24) se observa dicha aplicación para prueba en vehículos.



**Figura 25.** Cámara de alta velocidad PHANTOM V2512

El objetivo es tener un punto fijo en la probeta y realizar el seguimiento del mismo durante el ensayo, para la obtención de la aceleración, como se observa en la figura, en el ejemplo este punto correspondería al ubicado en el cráneo del maniquí.



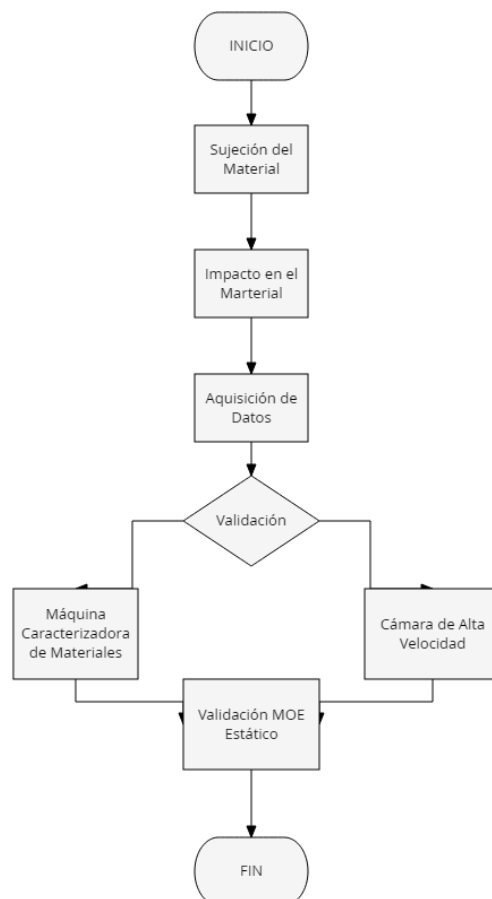
**Figura 26.** Ejemplo del tracking (seguimiento), realizado por la cámara

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo, se analizará los resultados obtenidos en la caracterización de materiales, tanto en el ensayo no destructivo propuesto como en la cámara de alta velocidad

#### 4.1. Funcionamiento



**Figura 27** Diagrama de flujo del funcionamiento del proyecto

Explicando la figura, observamos que el primer paso es la sujeción del material en la máquina caracterizadora, después se procede a realizar el impacto en las probetas, para la adquisición de datos se utiliza tanto el método analógico como el digital que son parte de la máquina y como método aparte de validación, la utilización de la cámara de alta velocidad, para finalmente comparar la frecuencia obtenida con el módulo de elasticidad estático y validar los métodos

#### **4.2. Análisis de resultados**

Con el fin de demostrar que los datos adquiridos por el equipo representan las características de los materiales en la realidad, procedemos a analizar los datos obtenidos durante los ensayos correspondientes a distintos materiales isotrópicos y compara con los valores teóricos.

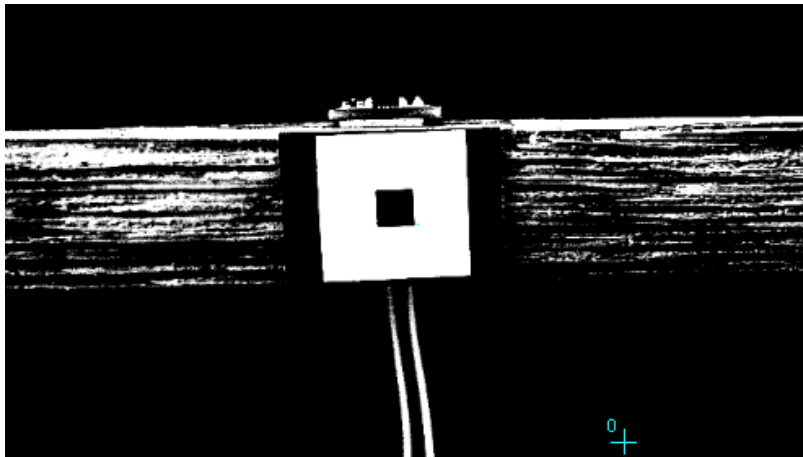
Los datos obtenidos proceden de tres diferentes fuentes, en este caso son:

- Acelerómetro ADXL335
- Acelerómetro BNO055
- Cámara de alta velocidad Phantom

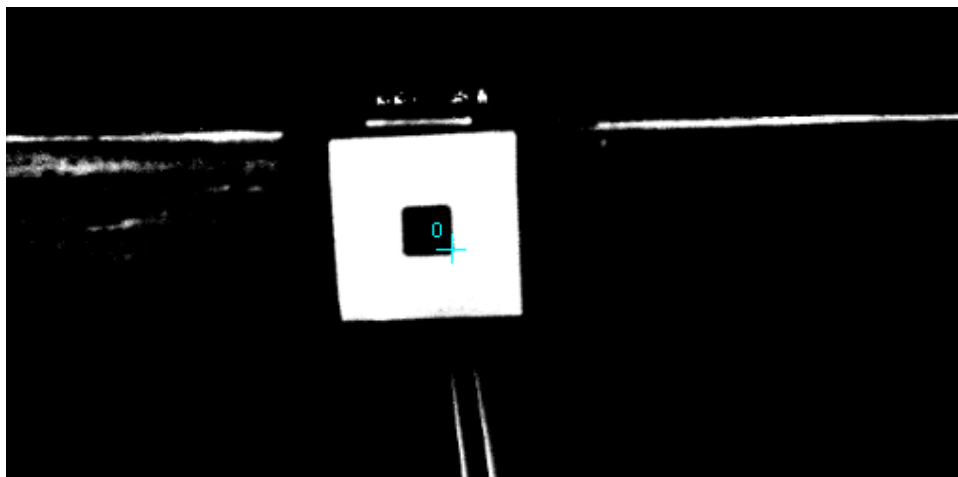
El método utiliza la ecuación de cálculo la frecuencia natural calculada a partir de los datos obtenidos previamente.

#### 4.2.1. Madera de Chonta

Los ensayos se realizaron en una probeta de madera de chonta de 25x25x1000 mm dimensiones, empotrada en cantiléver. Los sensores se encontraban a 10cm del extremo de la probeta.

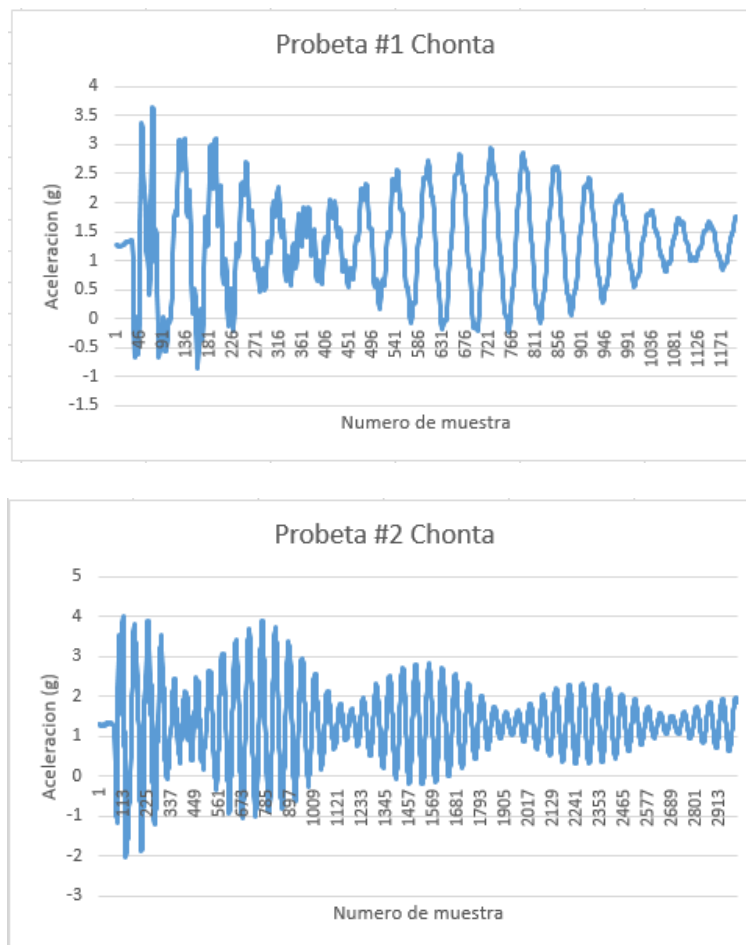


**Figura 28.** Probeta #1 (Madera de chonta)



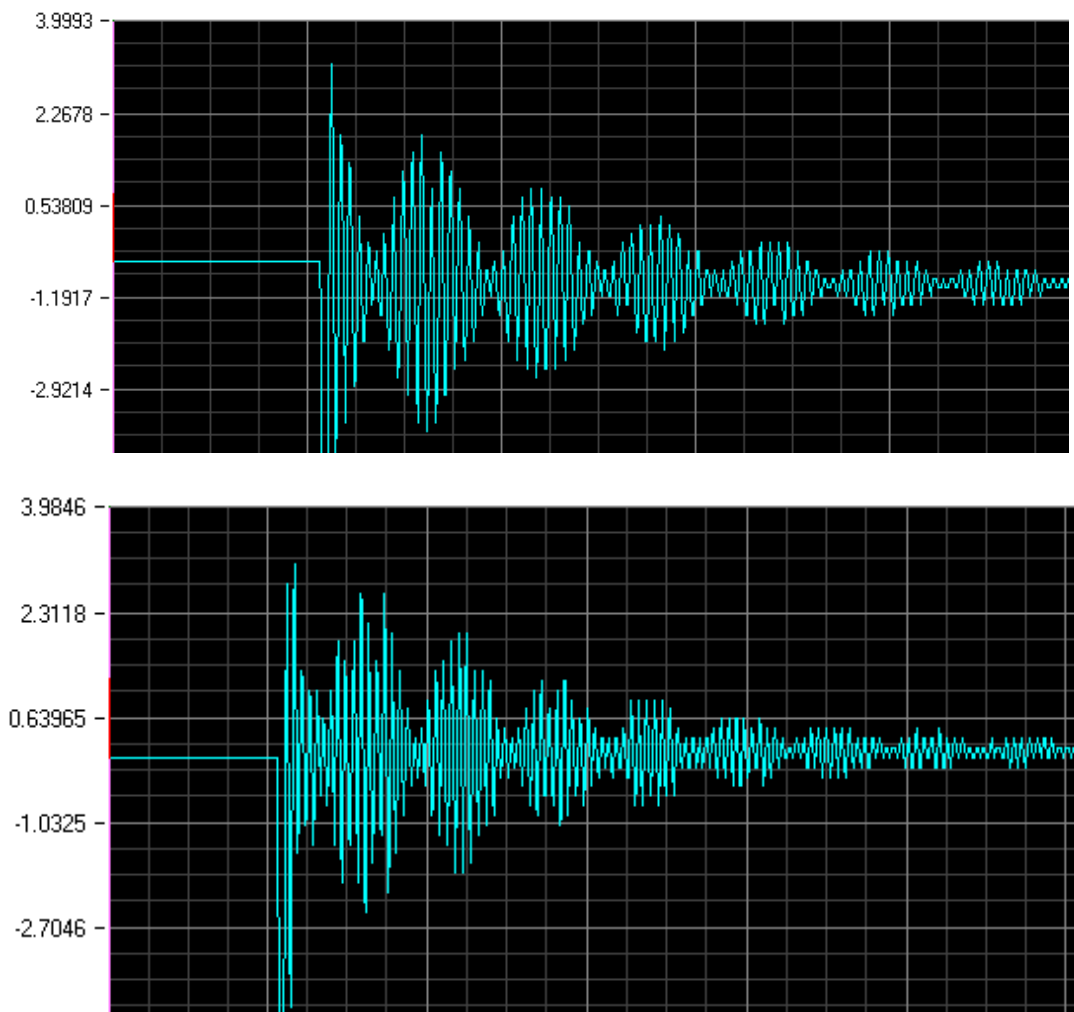
**Figura 29.** Probeta #2 (Madera de chonta)

Además de los sensores acelerómetros, las probetas cuentan con un patrón impreso que facilita el reconociendo del movimiento de la probeta.



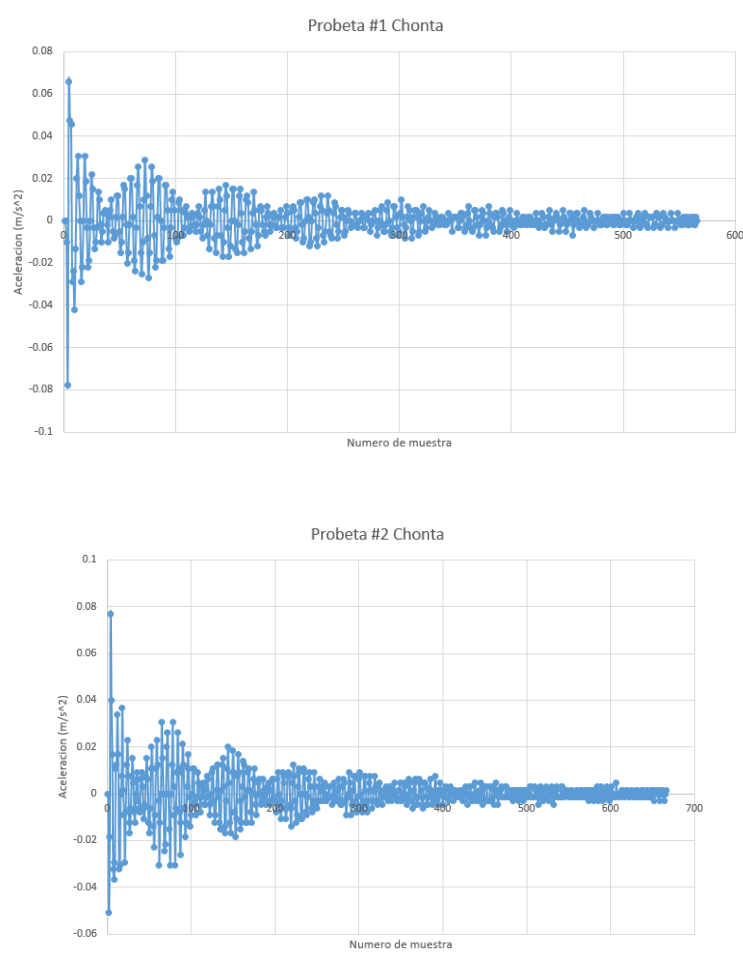
**Figura 30.** Datos adquiridos con Acelerómetro ADXL335.

Mayores tiempos de duración del ensayo permitieron mejorar la apreciación del fenómeno estudiado.



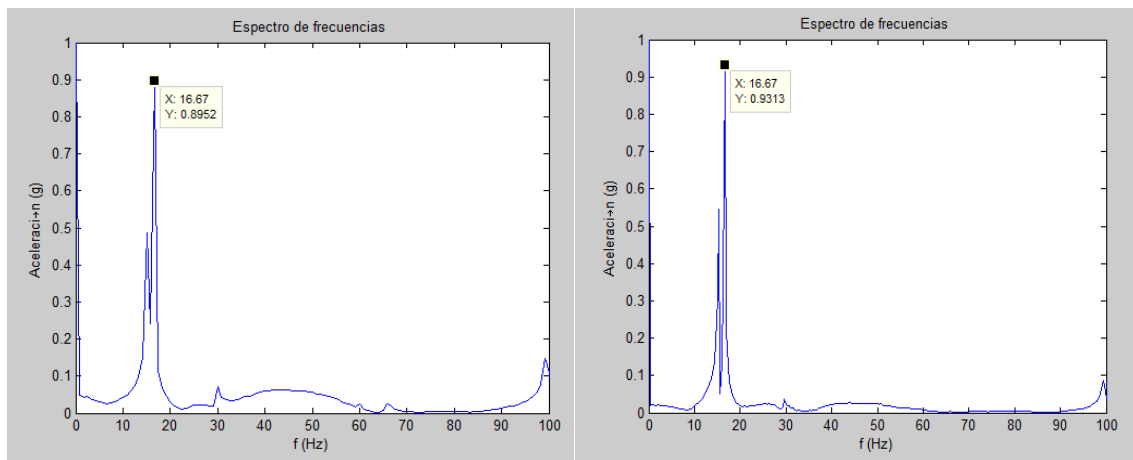
**Figura 31.** Datos adquiridos con Cámara de Alta Velocidad PHANTOM V2512



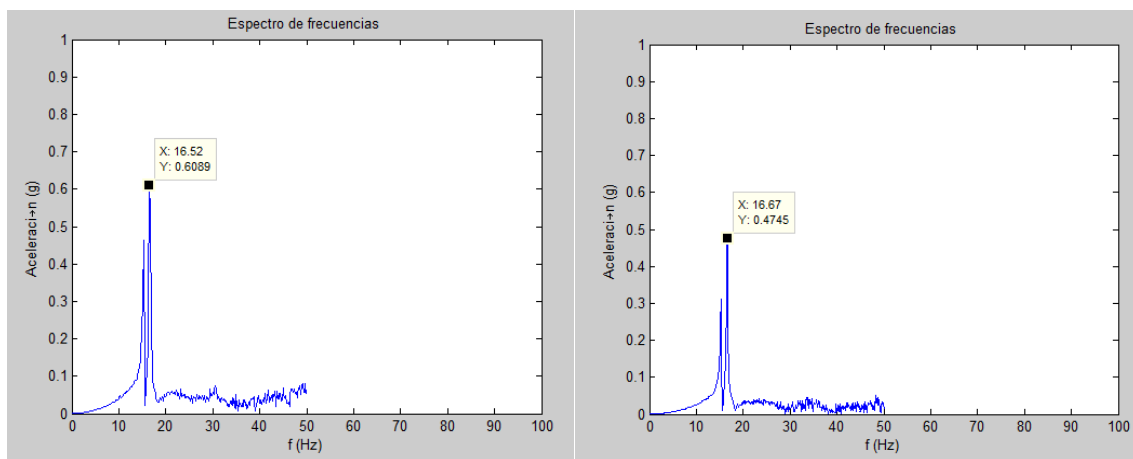


**Figura 32.** Datos representados en hoja de celdas.

Utilizando la transformada de Fourier, se procede a encontrar la frecuencia natural que gobierna al fenómeno censado.



**Figura 33.** Espectro de frecuencias Datos Acelerómetros



**Figura 34.** Espectro de frecuencia Datos Cámara

Aplicando la ecuación se procede a calcular el MOE dinámico

$$E = \frac{w^2 \rho A l^4}{I(\beta l)^4} \quad (9)$$

Donde

- $w$  Frecuencia angular de la vibración (rad/s), la cual se obtiene a partir de los resultados del espectro de frecuencia multiplicado por  $2\pi$ .
- $\beta l$  Coeficiente determinado por el modo de vibración de la viga y sus condiciones de frontera.
- $I$  Inercia de la viga ( $m^4$ )
- $\rho$  Densidad ( $kg/m^3$ )
- $A$  Area de sección transversal ( $m^2$ )
- $L$  Longitud de la fuerza aplicada (m)
- $E$  Módulo de elasticidad dinámica (Pa)

Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla:

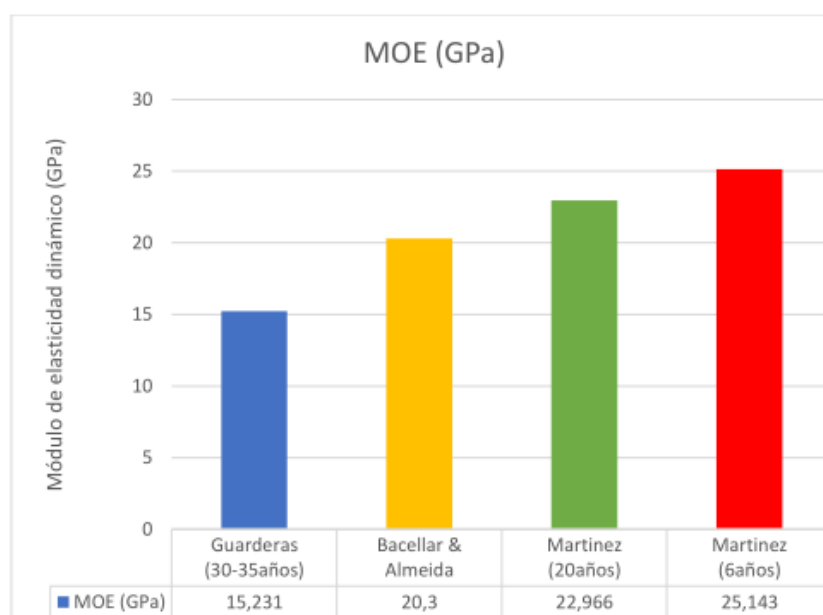
**Tabla 5**

*Valores calculados de MOE.*

Probeta	Sensor	Frecuencia Natural (Hz)	MOE (GPa)
1	Acelerómetro ADXL335	16.67	23.92
2	Cámara de alta velocidad Phantom	16.52	23.49
1	Acelerómetro ADXL335	16.67	23.93
2	Cámara de alta velocidad Phantom	16.67	23.92

Comparando los valores adquiridos con experimentaciones previas realizadas por Martínez (2013) donde obtuvo 25.143 GPa y 22.966 GPa y Bacellar y Almeida (2009) con un MOE de 20.3 GPA, podemos apreciar que el equipo presenta valores muy cercanos a la realidad (Guarderas, 2018).

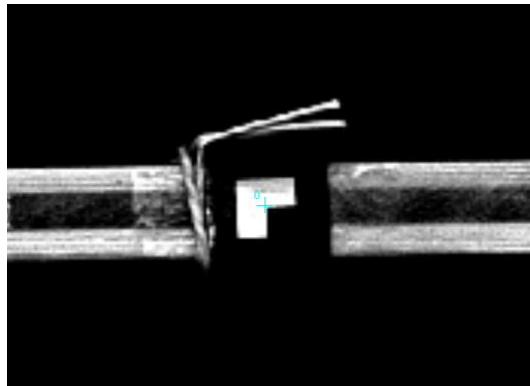
Conviene recordar que para materiales isotrópicos como es en este caso la madera de chonta, la edad del árbol, al igual que las condiciones de almacenamiento, humedad del ambiente, incluso variaciones en la microestructura propia de cada ejemplar pueden generarse ligeras desviaciones de los valores teóricos.



**Figura 35.** Resultados adquiridos en estudios previos  
Fuente: (Guarderas, 2018)

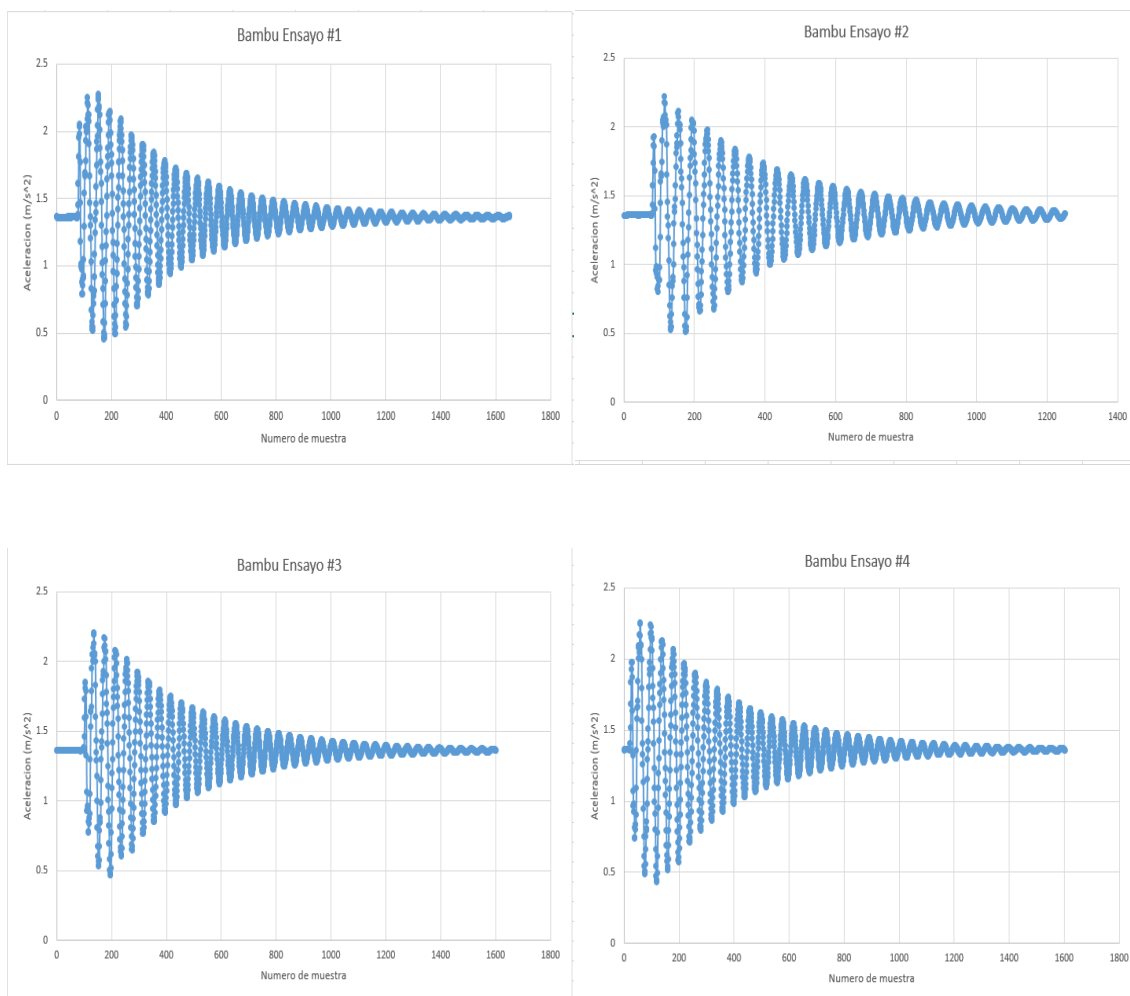
#### 4.2.2. Madera de Bambú

Los ensayos se realizaron en una probeta de madera de bambú de 15x32x1010mm dimensiones, empotrada en cantiléver. Los sensores se encontraban a 10cm del extremo de la probeta.

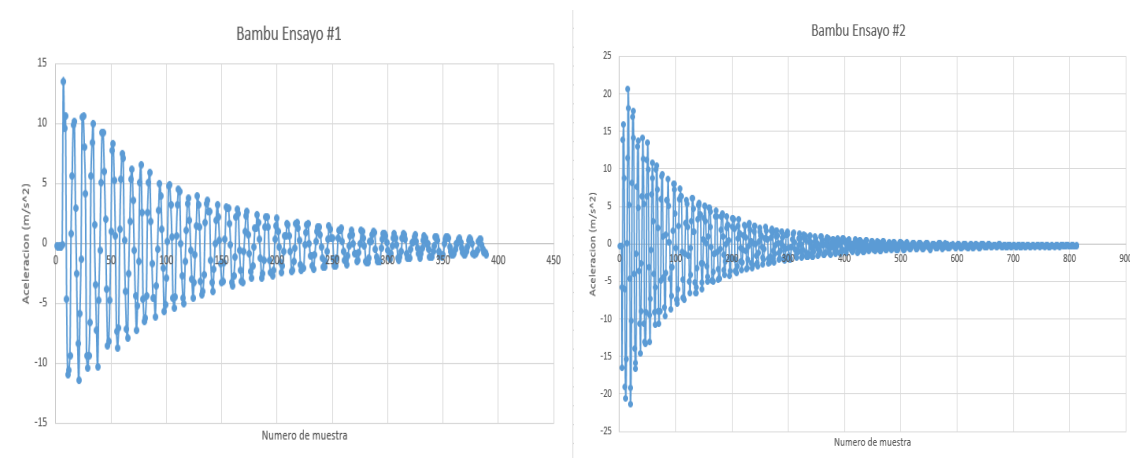


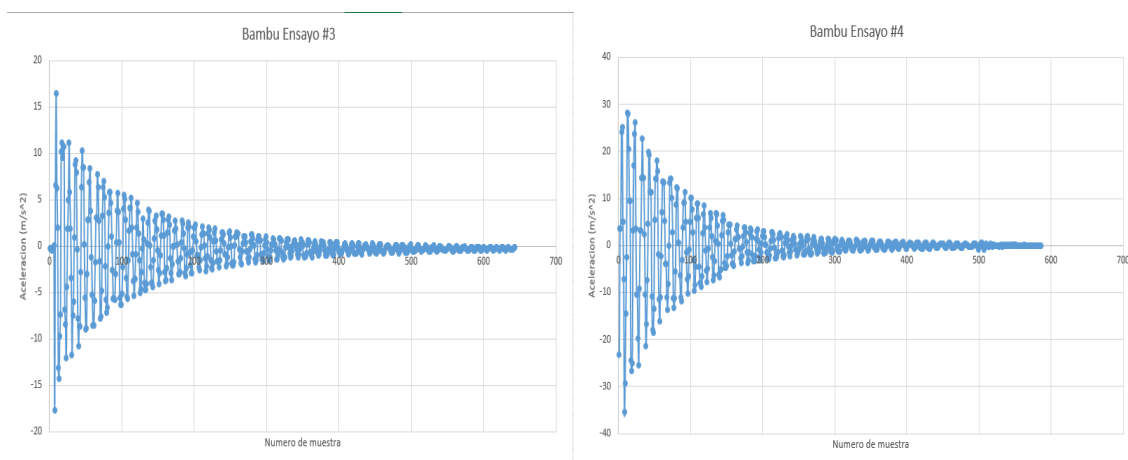
**Figura 36.** Probeta de Madera de Bambú

En esta ocasión se compararon los datos obtenidos por el Acelerómetro ADXL335, con una frecuencia de muestreo de 500 Hz y el Acelerómetro BNO055 con una frecuencia de muestreo de 500 Hz.



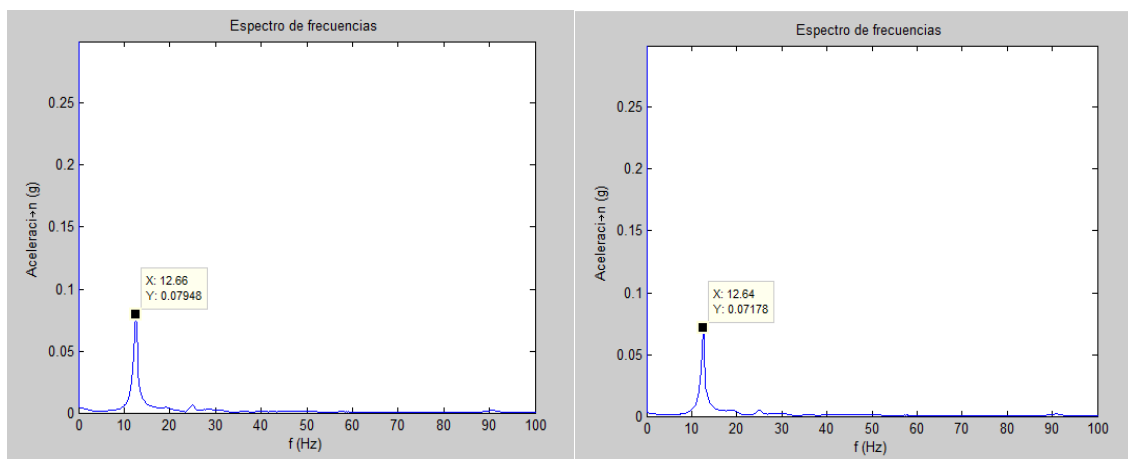
**Figura 37.** Datos adquiridos con el Acelerómetro ADXL335

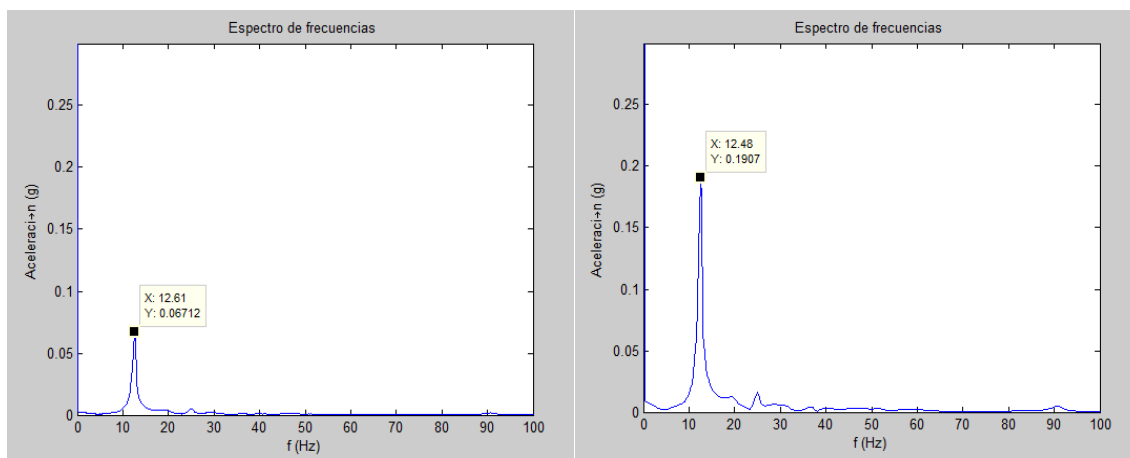




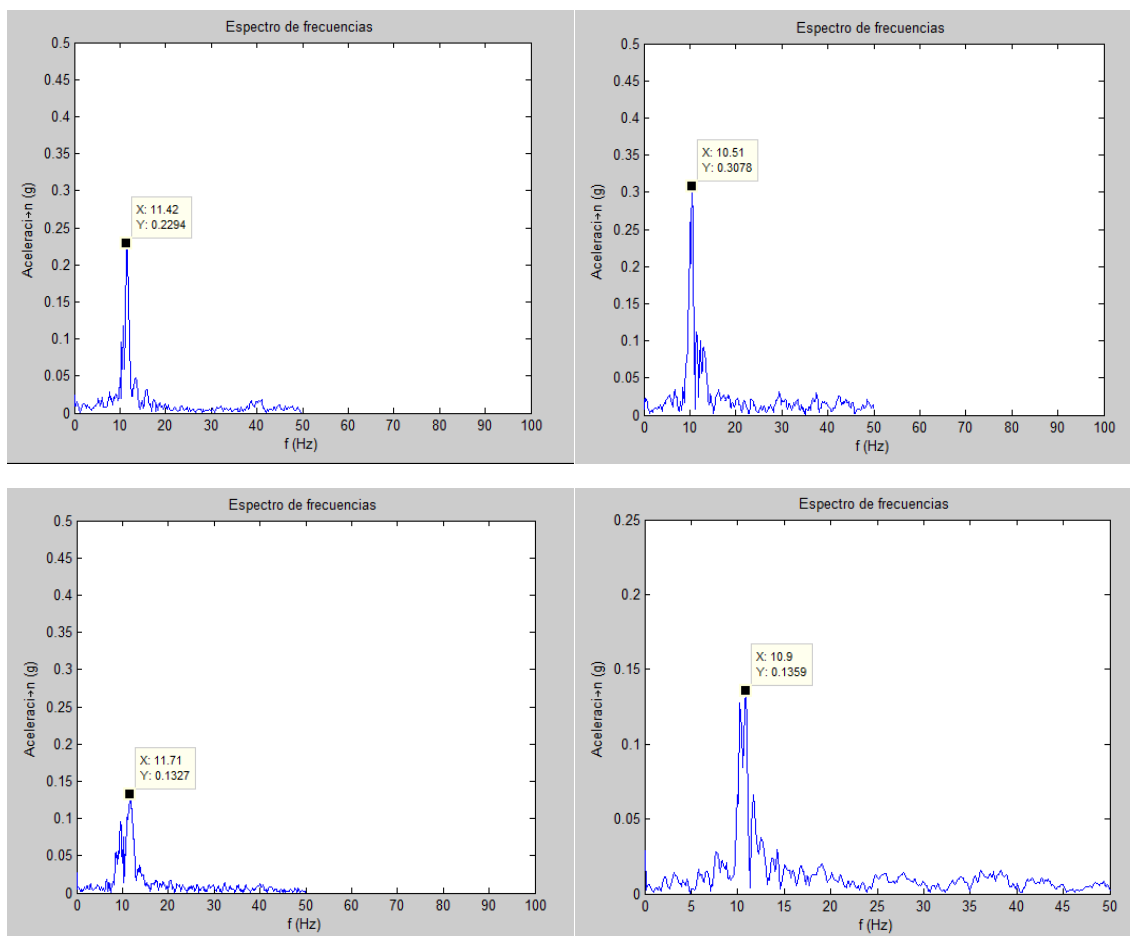
**Figura 38.** Datos adquiridos con Acelerómetro BNO055

De igual manera, se procede a encontrar la frecuencia natural para cada caso.





**Figura 39.** Espectro de frecuencias sensor Acelerómetro ADXL335



**Figura 40.** Espectro de frecuencias Acelerómetro BNO055



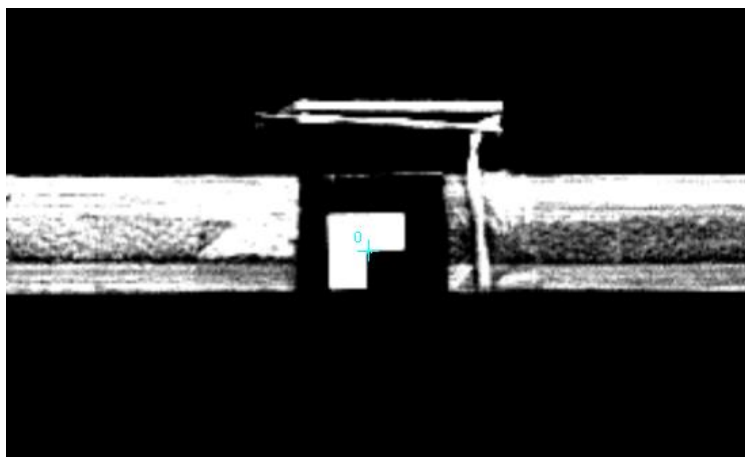
Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 6**

*Resultados Obtenidos de MOE por ensayo no destructivo.*

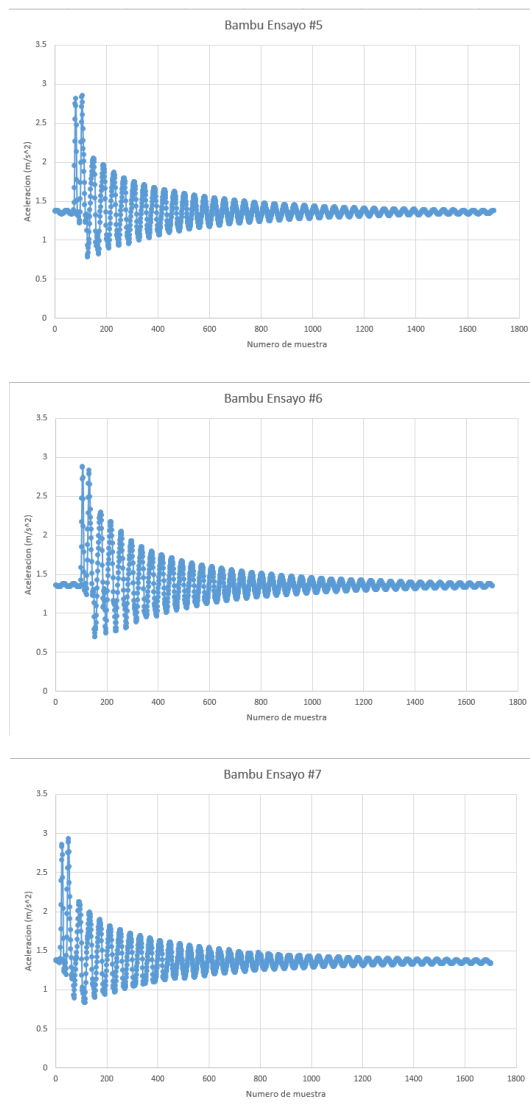
Probeta	Sensor	Frecuencia Natural (Hz)	MOE (GPa)
1	Acelerómetro ADXL335	12.66	12.61
1	Acelerómetro ADXL335	12.64	12.57
1	Acelerómetro ADXL335	12.61	12.51
1	Acelerómetro ADXL335	12.46	12.21
2	Acelerómetro BNO055	11.52	10.44
2	Acelerómetro BNO055	10.51	8.69
2	Acelerómetro BNO055	11.71	10.79
2	Acelerómetro BNO055	10.9	9.34

Se procede a validar los datos adquiridos con los sensores acelerómetros con el tercer método de adquisición de datos mediante la cámara de alta velocidad y análisis de imagen.

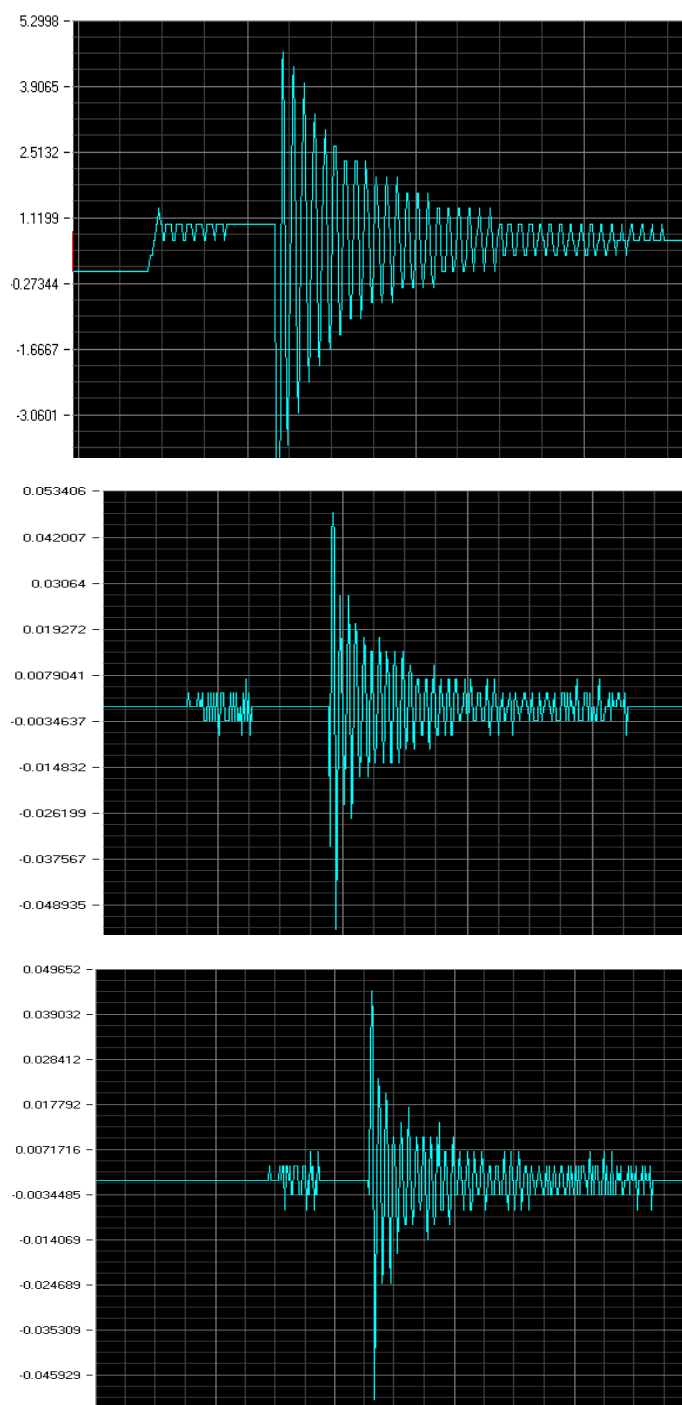


**Figura 41.** Probeta de Bambú

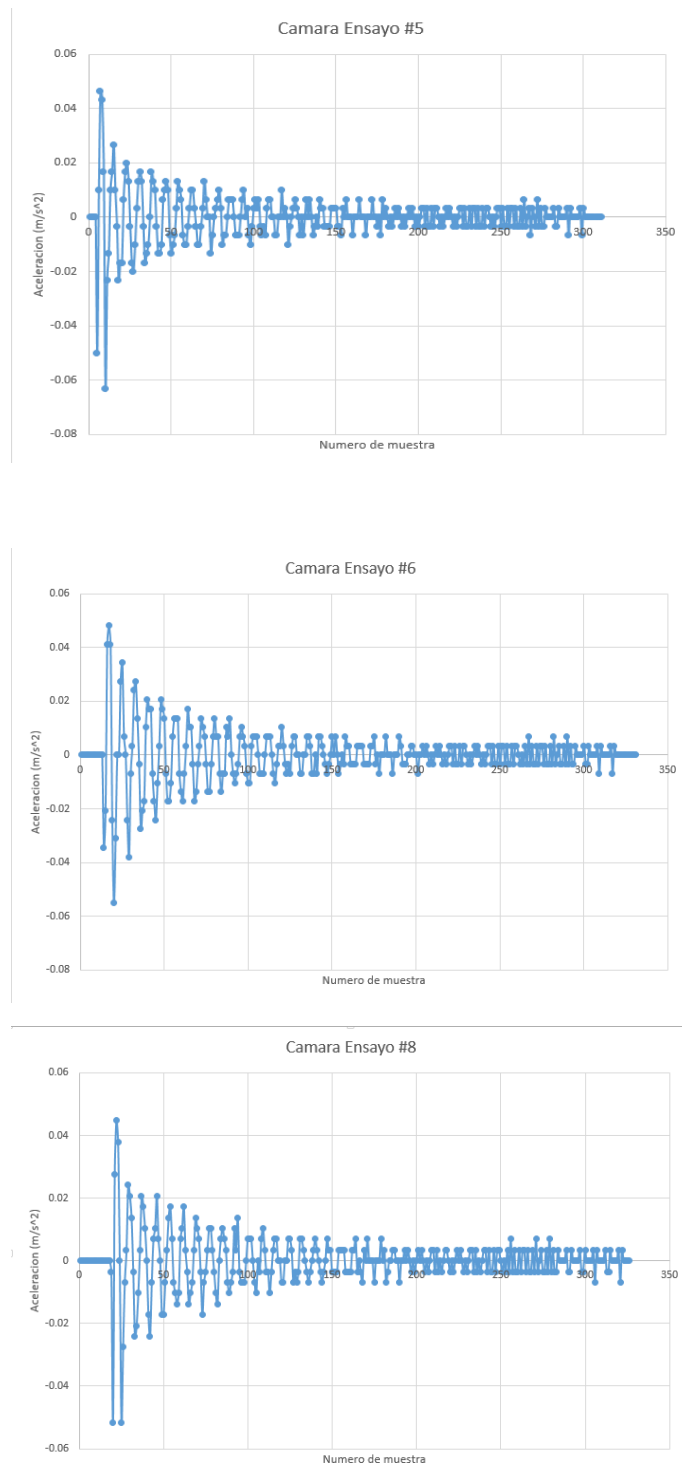
En esta ocasión se compararon los datos obtenidos por el Acelerómetro ADXL335, con una frecuencia de muestreo de 500 Hz y la Cámara de alta velocidad Phantom con una frecuencia de muestreo de 100 Hz.



**Figura 42.** Datos adquiridos con acelerómetro

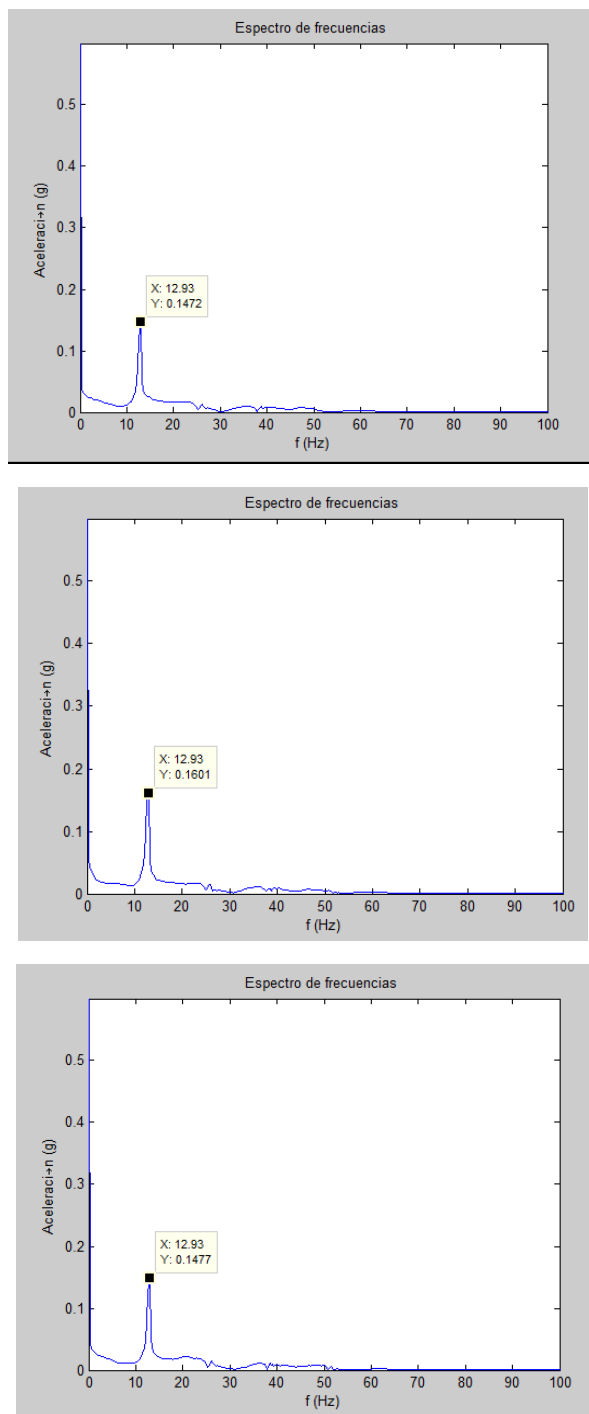


**Figura 43.** Datos adquiridos con Cámara de alta velocidad PHANTOM V2512

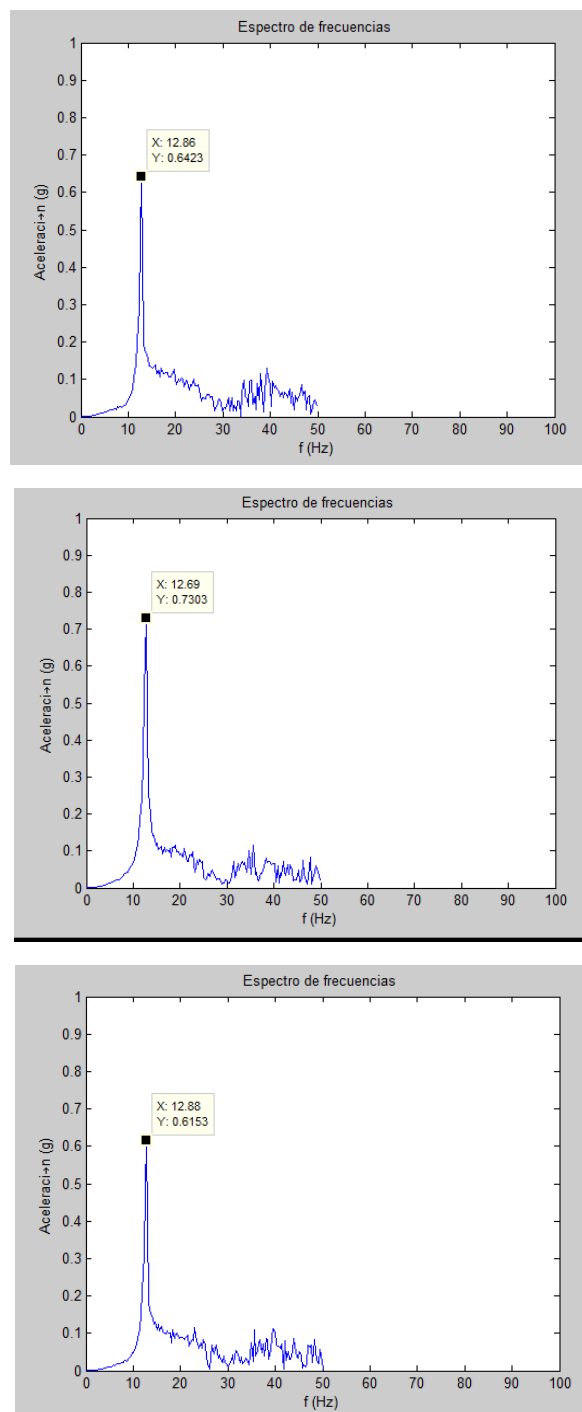


**Figura 44.** Datos adquiridos con análisis de imagen

De igual manera, se procede a encontrar la frecuencia natural para cada caso.



**Figura 45.** Espectro de frecuencia datos adquiridos con acelerómetro



**Figura 46.** Espectro de frecuencia datos adquiridos con cámara

Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 7**

*Datos obtenidos de MOE del Bambú.*

<b>Probeta</b>	<b>Sensor</b>	<b>Frecuencia Natural (Hz)</b>	<b>MOE (GPa)</b>
1	Acelerómetro ADXL335	12.93	13.15
1	Acelerómetro ADXL335	12.93	13.15
1	Acelerómetro ADXL335	12.93	13.15
1	Cámara de alta velocidad Phantom	12.86	13.01
1	Cámara de alta velocidad Phantom	12.69	12.67
1	Cámara de alta velocidad Phantom	12.88	13.05

Comparando los valores adquiridos con valores entregados en la ficha técnica de la empresa Bamboo Import Europe donde obtuvo 15.5 GPa, 14.9 GPa y 20 GPa, dependiendo de la sección de la cual se obtiene la muestra (Base, medio y copa de la planta), podemos apreciar que el equipo presenta valores representativos a la realidad (Schroder, 2016).

La ficha técnica muestra que existen variaciones en el módulo de elasticidad dependiendo de la vida de la planta, nuestros resultados se ajustan a los parámetros previstos por la empresa.

Compressive Strength of <i>Guadua angustifolia</i>					
		Age of Bamboo Stems (Years)			
		2	3	4	5
Bottom	E (N/mm <sup>2</sup> )	15500	16500	17400	15200
	$\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	39.9	38.1	37.6	32.1
Middle	E (N/mm <sup>2</sup> )	14900	18000	16800	16500
	$\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	27.2	42.1	41.5	34.7
Top	E (N/mm <sup>2</sup> )	20000	17000	17500	18200
	$\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	20.4	42.6	42.1	39.0

**Figura 47.** Características técnicas del Bambú  
Fuente: (Schroder, 2016)



## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

- Las diferencias entre los resultados obtenidos con el equipo y los datos teóricos provistos por investigaciones anteriores y fichas técnicas se deben principalmente a variables ajenas al método de adquisición de datos, como son, calidad de la madera, método de transporte y almacenamiento de las probetas, orientación del corte de la madera, orientación de las fibras en las probetas, edad de la planta de la cual se extrajo la madera, temperatura y tiempo de secado.
- Los diversos métodos de adquisición (acelerómetros y cámara de alta velocidad) brindan datos próximos a los valores teóricos, y entre sí, a pesar de sus diversas variaciones como son frecuencia de muestreo, capacidad de procesamiento, resolución de imagen.
- Las gráficas de aceleración – tiempo y espectro de frecuencia son de vital importancia para entender y visualizar fácilmente el ensayo realizado, facilita el cálculo de la frecuencia natural que gobierna el fenómeno estudiado y permite verificar el comportamiento dinámico esperado en el material.
- La correcta determinación de los tiempos de muestreo permite reducir la carga de análisis de los elementos de adquisición de datos (Tarjeta Rapsberry y Tarjeta DAQ NI) y software necesario para su funcionamiento, mejorando los tiempos de análisis de datos. La tarjeta de adquisición de datos DAQ NI opero con 500

muestras por segundo, la tarjeta Raspberry pi utilizo 100 muestras por segundo y la cámara de alta velocidad Phantom utilizo 100 frames por segundo. La cercanía de los resultados a pesar de las variables antes mencionadas demuestra que se puede optimizar las frecuencias de muestreo con el fin de reducir significativamente los tiempos de análisis y peso de los archivos históricos que almacenan los datos adquiridos.

- De igual manera la selección adecuada de la resolución del video facilita el análisis de imágenes, limitantes como la cercanía de la cámara a la probeta o excesivo tamaño de los archivos resultantes de video pueden entorpecer el estudio realizado. La adquisición de datos utilizando la cámara de alta velocidad utilizo una resolución de 768 x 576 y 1000 frames correspondieron a un tamaño aproximado de archivo de 496 Mbytes; comparando dicho valor con un aumento en la resolución de 1200x800 y 1000 frames produjo un archivo de 4 Gbytes, un claro exceso de adquisición de datos.
- La creación de HMI de fácil utilización permite al usuario adquirir datos de manera sencilla sin necesidad de que se requiera un conocimiento previo de programación en los métodos de cálculo, brindando la información del material de manera clara y automática.

## 5.2. Recomendaciones

- Asegurar las condiciones de los materiales a estudiar, evitar que las probetas se humedezcan, doblen o agrieten debido a las pobres condiciones de almacenamiento y/o de transporte, disminuyendo así la variación de datos adquiridos por malas probetas y mejorando la repetitividad de los datos adquiridos por el equipo.
- La aplicación correcta de la fuerza por el mecanismo de impacto asegurara un correcto ensayo, evitar un posible doble impacto donde el martillo golpe dos veces a la probeta debido a la falta de velocidad de los actuadores.
- El análisis dinámico requiere de un correcto mecanismo de agarre, que evite posibles deslizamientos, asegurarse de que la probeta se encuentre correctamente ajustada, reduciendo datos erróneos causados por resbalones de la probeta al aplicarse la fuerza.
- La correcta alimentación de las tarjetas de adquisición de datos y sus respectivos sensores evitara daños futuros y fallas en la lectura de datos producto de sensores en mal estado o dañados.
- La resolución de imagen juega un papel fundamental en la adquisición de datos mediante análisis de imagen, si la resolución no se encuentra acorde al fenómeno a estudiar, se puede producir situaciones donde no se reconozcan cambios en la probeta, también reduce el tamaño de los archivos a analizar y por consiguiente reduce los tiempos de análisis.

### 5.3. Trabajos futuros

- Utilizar los módulos disponibles del lenguaje de programación Python con el fin de mejorar los métodos de adquisición de datos y análisis de los mismos bajo una sola plataforma de código libre, reduciendo el número de software utilizado en el ensayo y de esta manera reducir costos al no requerir el uso de programas dedicados para análisis de datos.
- Considerar el uso de distintos actuadores mecánicos como pueden ser motores lineales, pistones eléctricos, cilindros hidráulicos o neumáticos, con el fin de asegurar una aplicación de fuerza instantánea y confiable, reduciendo malas mediciones causadas por actuadores de baja velocidad.

## BIBLIOGRAFÍA

- Almeida, F., & Martinez, M. (2015). Caracterización Dinámica de la Madera de Balsa en el Ecuador. *Universidad de las Fuerzas Armadas*.
- Baetigg, R. (2001). Determinación del Módulo de Elasticidad de la Madera Mediante Vibraciones Transversales. *Maderas Ciencia y Tecnología*.
- Digikey. (29 de Junio de 2012). *Acelerómetro ADXL335*. Obtenido de Digikey: <https://www.digikey.com/es/product-highlight/a/analog-devices/adxl335-small-low-power-3-axis-accelerometer>
- Gomez, A. (2018). La casa de la calidad: Herramienta de planificación del diseño. *Guía de Elaboración de un Manual de Calidad*.
- Green, D., Winandy, J., & David, K. (1999). Mechanical properties of wood. *Wood handbook : wood as an engineering material*.
- Guarderas, D. (2018). Caracterización del Módulo de Elasticidad Estático y Dinámico de la madera Bactris Gasipaes (Chonta) de Ecuador. *Universidad de las Fuerzas Armadas*.
- Khalifa, A. (2007). Caracterización dinámica mediante barra Hopkinson de materiales cerámicos monolíticos y compuestos. *Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*.
- National Instruments, j. (4 de Mayo de 2016). *Dominio de Frecuencia en Medidas*. Obtenido de National Instruments: <http://www.ni.com/tutorial/13042/es/>

Nzokou, P. (2005). Relationship between non destructive and static modulus.

*Original Albertein.*

Paz, P. (20 de Febrero de 2009). *Transformada de Fourier*. Obtenido de Uniovi:

<http://www6.uniovi.es/vision/intro/node19.html>

Raspberry Shop, S. (2016). *Raspberry Shop*. Obtenido de Raspberry Pi 2 Model B:

<https://www.raspberrystore.com/raspberry-pi-2-model-b.php>

Ross, R. (2015). Nondestructive Evaluation of Wood. En R. Ross, *Nondestructive*

*Evaluation of Wood* (pág. 176). Madison: United States Department of

Agriculture.

Sabbagh, J., Vreven, J., & Leloup, G. (2001). Dynamic and Static Moduli of Elasticity of

resin based materials. *Elsevier Dental Materials*.

Sanite. (2015). Técnicas de Ensayos no Destructivos. *Diagnóstico, saneamiento y*

*conservación de madera*, 5.

Schroder, S. (15 de Noviembre de 2016). *Bamboo Import*. Obtenido de What are the

Mechanical Properties of Bamboo: [https://www.bambooimport.com/en/blog/what-](https://www.bambooimport.com/en/blog/what-are-the-mechanical-properties-of-bamboo)

[are-the-mechanical-properties-of-bamboo](https://www.bambooimport.com/en/blog/what-are-the-mechanical-properties-of-bamboo)

Townsend, K. (2018). Adafruit BNO 055 Absolute Orientation Sensor. *Adafruit Learning System*, 30.