

DESARROLLO DE UN ANALIZADOR DE VIBRACIONES PARA SER  
IMPLEMENTADO EN EL SISTEMA ROTOR KIT DE LA UNIVERSIDAD  
PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA

DANIEL FELIPE AGUILAR PATIÑO  
MIGUEL ÁNGEL ZAPATA ROJAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA  
2018

*Vbo Sergio A Gamero*

**DESARROLLO DE UN ANALIZADOR DE VIBRACIONES PARA SER  
IMPLEMENTADO EN EL SISTEMA ROTOR KIT DE LA UNIVERSIDAD  
PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA**

DANIEL FELIPE AGUILAR PATIÑO  
MIGUEL ÁNGEL ZAPATA ROJAS

Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de:  
INGENIERO MECÁNICO

Director del Proyecto  
SERGIO ANDRES GÓMEZ SUAREZ  
Msc Ing.

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA

2018

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

Presidente del jurado

---

Jurado

---

Jurado

Ciudad y fecha:

## **DEDICATORIA**

A mi nona por y para ella.  
A mi mama por todo su amor, cariño y complicidad.  
A mi papa por su incondicionalidad.  
A mi hermano por ser mi infaltable compañero.  
A mi flaca por toda su paciencia y amor.

**Daniel Felipe Aguilar Patiño**

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi nona por su infinito amor.

A mis padres por todo su cariño y amor a lo largo de los años.

A mi hermano.

Al ingeniero Sergio por su incondicional ayuda y paciencia.

A Lina María Velandia sin ella este trabajo no hubiera sido posible.

**Daniel Felipe Aguilar Patiño**

A mis padres por el apoyo incondicional, mis abuelos, tíos

A mi docente Sergio que sin el apoyo de él no habiéramos podido realizar este  
proyecto

**Miguel Ángel Zapata Rojas**

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	14
1. OBJETIVOS .....	15
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	15
2. JUSTIFICACIÓN.....	16
3. MARCO TEÓRICO .....	17
3.1 Vibración .....	17
3.1.1 Vibración compuesta .....	17
3.2 Análisis modal .....	24
3.2.1 ANSYS Workbench .....	25
3.2.2 Análisis modal de ANSYS.....	25
3.2.3 Usos para el análisis modal .....	25
3.2.4 Comandos utilizados en un análisis modal .....	26
3.2.5 Resumen de los pasos en un análisis modal .....	26
3.3 LabVIEW .....	26
3.4 Variador de frecuencia .....	26
3.5 Sensor piezoeléctrico .....	27
3.6 Mini-Shakers Modelos 2004E.....	28
3.9 Norma ISO 10816 .....	29
4. METODOLOGÍA.....	30
4.1 Identificación de herramientas y elementos a utilizar .....	30
4.2 Determinación de las condiciones físico-mecánicas del rotor kit .....	31
4.3 Adecuación de las condiciones del rotor kit .....	31
4.4 Estudio dinámico vibratorio por medio del análisis modal .....	31
4.5 Desarrollo del programa en el software LabVIEW .....	31
5. ADECUACIÓN E INSTRUMENTACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS ROTOR KIT .....	33

5.1. Adecuaciones Mecánicas.....	33
5.1.1. Implementación de un sistema motriz.....	34
5.1.2 Desarrollo de soportes, eje y rotores (partes inducidas del banco de pruebas rotor kit).....	35
5.2 Instrumentación del banco de pruebas.....	40
5.2.1 Sensores de las vibraciones.....	40
5.2.2 Sensor de Rpm.....	45
5.2.3 Sistema adquisición de datos .....	46
6. ESTUDIO DINÁMICO VIBRATORIO POR MEDIO DE ANÁLISIS MODAL DEL EJE .....	49
6.1 Análisis modal experimental.....	49
6.2 Análisis modal métodos de elementos finitos .....	54
6.3 Comparación.....	62
7. DESARROLLO DE PROGRAMA EN LABVIEW .....	63
7.1 Lectura inicial y parametrización de la señal .....	63
7.2 Forma de onda.....	66
7.3 Balanceo .....	68
7.4 Espectro.....	69
7.5 Promedio y ventanas .....	72
7.6 Velocidad .....	73
7.7 Waterfall.....	74
8. CONSULTA BIBLIOGRÁFICA.....	75
9. CONCLUSIONES .....	76
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77
ANEXOS.....	79

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades del Grilon.....	39
Tabla 2. Variación de la sensibilidad del sensor ADXL 335 .....	43
Tabla 3. Resultado frecuencia naturales Punto 1.....	51
Tabla 4. Resultado frecuencias naturales Punto 2.....	51
Tabla 5. Resultado frecuencia naturales Punto 3.....	52
Tabla 6. Resultado frecuencias naturales punto 4 .....	53
Tabla 7. Análisis de resultados .....	53
Tabla 8. Propiedades del material AISI 1020 .....	55
Tabla 9. Resultado Simulación de frecuencias naturales.....	62
Tabla 10. Comparación de frecuencia naturales experimentales y Teóricas.....	62

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Vibración compuesta .....	18
Figura 2. Amplitud.....	20
Figura 3. Forma de onda .....	22
Figura 4. Espectro de vibración .....	23
Figura 5. Fase de un rotor .....	24
Figura 6. Modo de estructura de las formas .....	24
Figura 7. Variador de frecuencia.....	27
Figura 8. Sensor piezoeléctrico .....	28
<b>Figura 9.</b> Mini-Shakers Modelos 2004E .....	29
Figura 10. Procedimiento metodológico.....	30
Figura 11. Banco de pruebas rotor kit previo .....	33
Figura 12. Motor ABB serial M2QA71N2A, 60 hz, 3350 rev/min.....	34
<b>Figura 13.</b> Imagen del variador ABB IP20/UL Open type.....	34
Figura 14. Eje de Acero 1020 de ½” .....	35
Figura 15. Rodamiento seleccionado Referencia 6203 2RSC3 1/2 .....	36
<b>Figura 16.</b> Camisa de los rodamientos fabricados en Acero 1020 .....	36
Figura 17. Rotores fabricados en Acero 1020.....	36
Figura 18. Planos de las camisas de los rodamientos .....	37
Figura 19. Plano de los rotores.....	37
Figura 20. Prueba analizadora de vibraciones.....	38
Figura 21. Propiedades acero inoxidable.....	38
Figura 22. Piezas finalizadas en acero inoxidable 304 .....	39
Figura 23. Rotores fabricados en Grilon .....	40
Figura 24. Sensor ADXL 335.....	41
Figura 25. Osciloscopio prueba de sensor AXDL 335 a 50 Hz.....	41
Figura 26. Osciloscopio prueba de sensor AXDL 335 a 55 Hz.....	42
Figura 27. Osciloscopio prueba de sensor AXDL 335 a 85 Hz.....	42
Figura 28. Mini Shaker de marca modal shop Modelo 2004E.....	42

Figura 29. Shaker ref 396C010.....	43
Figura 30. Forma de onda senoidal producida por el sensor ADXL 335 a los 400 Hz.....	44
Figura 31. Forma de onda senoidal producida por el sensor ADXL 335 a los 500 Hz.....	44
<b>Figura 32.</b> Forma de onda senoidal producida por el sensor ADXL 335 a los 663 Hz.....	44
Figura 33. Sensores IEP.....	45
Figura 34. Sensor OROS referencia OTAC-TAC-001.....	46
Figura 35. Tarjeta adquisición arduino.....	47
Figura 36. Tarjeta NI 9234.....	47
Figura 37. Banco de pruebas rotor kit.....	48
Figura 38. Montaje con Mini-Shakers 2004E.....	49
<b>Figura 39.</b> Configuración plataforma del software.....	50
Figura 40. Configuración de pruebas.....	50
Figura 41. Punto 1.....	51
Figura 42. Punto 2.....	51
Figura 43. Punto 3.....	52
Figura 44. Punto 4.....	53
Figura 45. Diseño del eje en Solidwork.....	54
<b>Figura 46.</b> Análisis modal.....	54
<b>Figura 47.</b> Engineering Data.....	55
<b>Figura 48.</b> Importación de geometría a Ansys Workbech.....	56
<b>Figura 49.</b> Selección Model.....	56
Figura 50. Aplicación material del acero AISI 1020 a la pieza.....	57
Figura 51. Mallado automático de Ansys.....	57
Figura 52. Porcentaje de malla métrica.....	58
Figura 53. Restricción de desplazamiento del eje.....	59
Figura 54. Selección de modos de falla.....	59
Figura 55. Deformación total del eje.....	60

<b>Figura 56.</b> Modo de vibración frecuencia natural 1.....	60
<b>Figura 57.</b> Modo de vibración Frecuencia natural 2 .....	61
<b>Figura 58.</b> Modo de vibración 3.....	61
Figura 59. DAQmx Create Channel .....	64
Figura 60. DAQmx Read.....	64
Figura 61.DAQmx Timming .....	65
Figura 62. Menú de configuración de los canales y sus parámetros.....	65
Figura 63. Pestaña forma de Onda.....	66
Figura 64. Filtro.....	67
Figura 65. Vibration level .....	67
Figura 66. Pestaña balanceo .....	68
Figura 67. Analog Tacho Processing .....	68
Figura 68. Order Tracking.....	69
Figura 69. Pestaña de espectro.....	69
Figura 70. Peak Search .....	70
Figura 71. Power Spectrum .....	71
Figura 72. Zoom Power Spectrum .....	71
Figura 73. Pestaña promedio y ventana .....	72
Figura 74. Power Spectrum and PSD.....	72
Figura 75. Pestaña velocidad .....	73
Figura 76. Vibration level .....	74
Figura 77. Pestaña waterfall .....	74
<b>Figura 78.</b> Buffer waterfall graph.....	75

## RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

**TITULO:** Desarrollo de un analizador de vibraciones para ser implementado en el sistema rotor kit de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga

**AUTOR(ES):** Daniel Felipe Aguilar Patiño  
Miguel Ángel Zapata Rojas

**PROGRAMA:** Facultad de Ingeniería Mecánica

**DIRECTOR(A):** Sergio Andrés Gómez Suárez

### RESUMEN

En las condiciones habituales de funcionamiento, los sistemas mecánicos rotativos emiten vibraciones debido a las propiedades inherentes de su estructura y por presentar irregularidades de operación como desalineamiento, desbalanceo, entre otras, impiden que una máquina funcione de manera eficiente. Por lo tanto, para predecir estas fallas se realiza usualmente un análisis de las vibraciones. Los sistemas actuales de análisis de vibración ofrecen gran precisión sin embargo son de alto costo y difícil adquisición. Por tal motivo, el objetivo de este proyecto fue desarrollar un analizador de vibraciones basado en un sistema de adquisición de datos en la plataforma virtual LabVIEW, implementado en el banco de pruebas rotor kit de la Universidad, usándose como una herramienta virtual de fácil uso y acceso para los estudiantes; donde se pueden evidenciar los espectros típicos de vibración relacionados con las fallas mecánicas de la maquinaria rotativa.

### PALABRAS CLAVE:

Analizador, máquina rotativa, vibraciones

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

## GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

**TITLE:** Development a vibration analyzer to be implemented in the rotor kit system at the University Pontificia Bolivariana Bucaramanga sectional.

**AUTHOR(S):** Daniel Felipe Aguilar Patiño  
Miguel Ángel Zapata Rojas

**FACULTY:** Facultad de Ingeniería Mecánica

**DIRECTOR:** Sergio Andrés Gómez Suárez

### ABSTRACT

In usual working conditions, the rotating mechanical systems issue vibrations due to properties of their structure and to report irregularities of operation such as misalignment, unbalance, etc. prevent that a machine works efficiently. Therefore, to predict these failures usually need a Vibration analysis. The current systems vibration analysis are accurate however they are expensive and difficult to acquire. For this reason, the objective of this project was develop a vibration analyzer based on a data acquisition system in the LabVIEW virtual platform, implemented in the University's rotor kit, it used as an easy-to-use virtual tool and access for students; Where you can see the typical spectra of vibration related to the mechanical failures of the rotating machinery.

### KEYWORDS:

Analyzer, rotative machine, vibrations

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

## INTRODUCCIÓN

La importancia del mantenimiento industrial se fundamenta en la necesidad de las empresas de conservar sus máquinas funcionando de manera continua y eficientemente. Para llevar a cabo este objetivo, se conocen formas de mantenimiento: correctivo, preventivo, predictivo y basado en confiabilidad [1].

El mantenimiento predictivo es una herramienta básica fundamenta en el mantenimiento. Este a su vez consta de una serie de técnicas, para determinar cuándo una máquina no está trabajando de la manera correcta. Una de las técnicas es por medio del análisis de vibraciones, basándose en que todas la máquinas tienen niveles de vibración, sin embargo, cuando existe alguna falla, estos niveles vibratorios se alteran [1].

En el ámbito académico, la enseñanza de estas técnicas, se realizan en Laboratorios de Ingeniería, donde se desarrolla bancos de pruebas de vibraciones a través de un sistema con equipos Rotor Kits los cuales son herramientas que imitan las condiciones y configuraciones frecuentemente halladas en sistemas electromecánicos rotativos industriales.

Para caracterizar visualmente las vibraciones que emite el sistema, se hace uso de un software que permite analizar y registrar las mediciones acústicas y de vibración del Rotor kits. Sin embargo, los softwares que se ofrecen actualmente a pesar de ser herramientas de alta importancia cuando se requiere para el aprendizaje en monitoreo y control de máquinas rotativas, resultan siendo de un alto costo y de difícil acceso para los estudiantes. Por tal motivo, el propósito de este trabajo fue desarrollar un analizador de vibraciones basado en un sistema de adquisición de datos, para ser implementado en el banco rotor kit de la universidad, con el fin de simular las probables fallas que pueda presentar una máquina rotativa, para el aprendizaje en el ámbito universitario

# 1. OBJETIVOS

## 1.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un analizador de vibraciones basado en un sistema de adquisición de datos para implementarse en banco rotor kit de la universidad donde se puedan evidenciar los espectros típicos de vibración relacionados con las fallas mecánicas de la maquinaria rotativa.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Adecuar e Instrumentar con sensores y equipos de adquisición de vibraciones el banco de pruebas rotor kit con que cuenta la universidad. **Resultado:** rotor kit instrumentado **Indicador:** condiciones de funcionamientos son las ideales y requeridas para la simulación defallas.
- Efectuar estudio dinámico vibratorio por medio del análisis modal al banco de pruebas rotor kit con que cuenta la universidad. **Resultado:** Estudio dinámico vibratorio del eje del rotor kit. **Indicador:** contraste con datos obtenidos mediante software y experimentación.
- Desarrollar un programa en LabVIEW que permita visualizar los valores de vibración, la forma de onda y el espectro resultado de la medición de vibraciones del banco rotorkit. **Resultado:** Software para la lectura de vibraciones producidas por un banco de pruebas. **Indicador:** Correcta visualización de las vibraciones emitidas cuando se simulan fallas.
- Realizar una consulta bibliográfica sobre vibraciones, sensores, análisis modal y sistema LabVIEW. **Resultado:** marco teórico. **Indicador:** información útil para el desarrollo del proyecto.

## 2. JUSTIFICACIÓN

El mantenimiento predictivo aplica técnicas no destructivas para determinar las condiciones de las máquinas rotativas. Una de las más usadas, es el análisis de vibraciones que permite conocer estado de los componentes de las máquinas mediante el monitoreo de sus vibraciones y de esta forma prevenir o detectar fallas que se ocasionen.

Para la implementación de esta técnica se utilizan equipos analizadores de vibración y programas informáticos que facilitan el análisis debido a proporcionan gráficas de las señales vibratorias para que se pueda realizar su interpretación. Por tal motivo, este proyecto de investigación está basado en hacer uso de instrumentación y software que permitan obtener las señales de vibraciones de manera gráfica, las cuales pueden ser usadas para realizar un análisis de mantenimiento.

El crear un analizador de vibraciones dirigido al ámbito universitario, abre la posibilidad a los estudiantes de eliminar las limitaciones de acceso a los ofrecidos en el mercado por su alto costo. De igual forma, el desarrollo de este tipo de herramientas contribuye fortaleciendo el aprendizaje de los profesionales en formación, puesto que brinda al alumno la posibilidad de enfrentarse a simulaciones de situaciones reales relacionadas con el funcionamiento de las maquinas, interactuando directamente con este tipo de equipos al que usualmente los estudiantes no tienen ningún tipo de acceso.

Este tipo de estudios brinda a los estudiantes una accesibilidad a técnicas de mantenimiento predictivo, para fortalecer la investigación y los laboratorios de aprendizaje relacionados con el área de la ingeniería mecánica.

## **3. MARCO TEÓRICO**

### **3.1 Vibración**

Una vibración es considerada como la oscilación, o el movimiento repetitivo de un objeto alrededor de una posición de equilibrio. La posición de equilibrio es a la que llegará, cuando la fuerza que actúa sobre él sea cero (0), este tiempo de vibración se llama vibración de cuerpo entero, lo que quiere decir que todas las partes del cuerpo se mueven juntas en la misma dirección en cualquier momento [2].

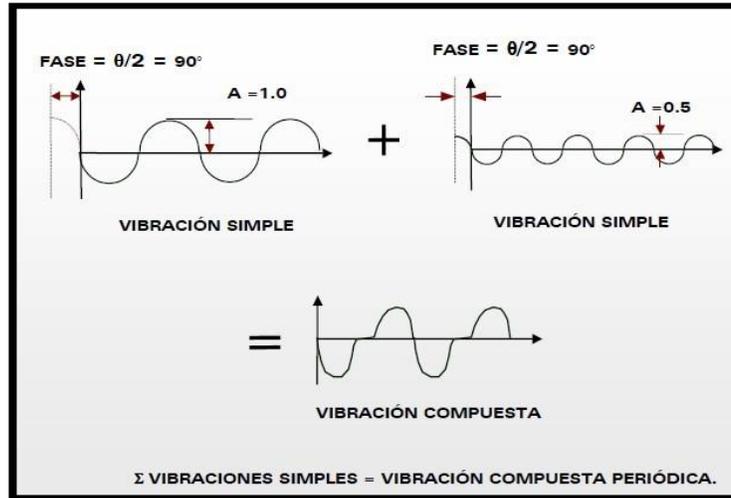
El movimiento vibratorio de un cuerpo entero se puede describir completamente, como una combinación de movimientos individuales de 6 tipos diferentes. Esos son traslaciones en las tres direcciones ortogonales x, y, y z, y rotaciones alrededor del eje x, y, y z [2].

La vibración de un objeto es causada por una fuerza de excitación. Esta fuerza se puede aplicar externamente al objeto o puede tener su origen dentro del objeto [2].

#### **3.1.1 Vibración compuesta.**

Una señal compuesta es una sumatoria de varias señales sinusoidales que comprenden cada uno de los componentes que se encuentran en la máquina, más todos los golpeteos y vibraciones aleatorias. El resultado es una señal como se muestra en la Figura 1 [3].

**Figura 1.** Vibración compuesta



Tomado de: «Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico» A-MAQ S.A, enero 2005. [En línea]. Disponible en:  
[http://www.mantenimientoplanificado.com/art%C3%ADculos%20PREDICTIVO\\_archivos/CURSO%20A%20MAQ.COM.pdf](http://www.mantenimientoplanificado.com/art%C3%ADculos%20PREDICTIVO_archivos/CURSO%20A%20MAQ.COM.pdf) [Consultada el 20 de octubre de 2018]

### 3.1.1.1 Frecuencia.

Es el número de ciclos que ocurre en un segundo y es el recíproco del periodo. La unidad de frecuencia es Hertz (Hz) [2].

$F =$  la frecuencia de la onda  $= 1/T$

### 3.1.1.2 El periodo (T).

Es el tiempo necesario para un ciclo o para un viaje ida y vuelta. El periodo se mide en segundos o milisegundos dependiendo de qué tan rápido se cambie la onda (ver Figura 2) [2].

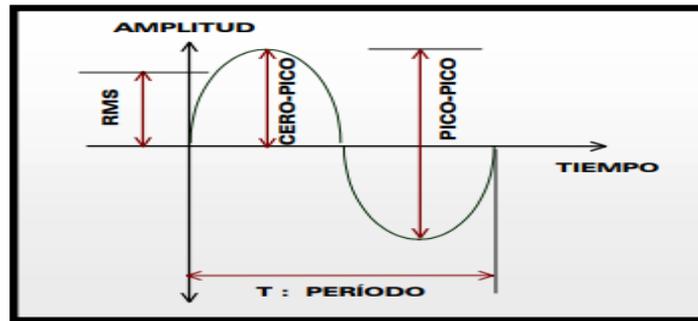
$T =$  el periodo de la onda.

### 3.1.1.3 Amplitud.

Es una medida de la variación máxima de una magnitud física que varía periódica o cuasi periódicamente en el tiempo. La misma se puede representar en unidades como se menciona a continuación (ver Figura 2):

- **Amplitud pico (Pk):** Es la distancia máxima de la onda del punto cero o del punto del punto de equilibrio [2].
- **Amplitud pico a pico (Pk-Pk):** Es la distancia de una cresta negativa hasta una cresta positiva. En el caso de una onda senoidal, el valor pico a pico es exactamente dos veces el valor pico, ya que la forma de la onda es simétrica [2].
- **Amplitud raíz del promedio de los cuadrados (Rms):** Es la raíz cuadrada del promedio de los cuadrados de los valores de la onda. En el caso de una onda senoidal el valor Rms es igual a 0,707 del valor pico. El valor Rms es proporcional al área debajo de la curva. Para calcular este valor, los valores instantáneos de amplitud de la onda se deben elevar al cuadrado y esos cuadrados se deben promediar durante un cierto tiempo. Este tiempo deber ser un promedio del periodo de la onda para llegar al valor Rms (figura 2) [2].

**Figura 2. Amplitud**



Tomado de: <<Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico>>A-MAQ S.A, enero de 2005. Disponible en: <http://www.mantenimientoplanificado.com/.pdf> [Consultada el 20 de octubre de 2018]

#### **3.1.1.4 Frecuencia natural y resonancia.**

La frecuencia natural ( **$F_n$** ) es la alteración de un sólido excitado de su posición de equilibrio, sucede cuando las frecuencias del resonador (objeto que oscila) y la fuente emisora coinciden, llegando a una condición conocida como resonancia [4].

La resonancia se define como la tendencia de un sistema físico a oscilar con una amplitud mayor en algunas frecuencias. La amplitud del sistema oscilante depende de la magnitud de la fuerza que se le aplique periódicamente al emisor de ondas y también está relacionada con las frecuencias de ondas del emisor y la frecuencia natural del sistema oscilante. Si la diferencia entre la frecuencia del emisor y la frecuencia del resonador es grande la amplitud del sistema resonador será mínima. Al igual que mientras más diferentes sean las frecuencias entre el generador y el resonador, se requerirá de mayor cantidad de energía para crear determinadas amplitudes de oscilación. En condición de resonancia, una fuerza de magnitud pequeña aplicada por el emisor puede lograr grandes amplitudes de oscilación en el sistema resonador, creando con ello perturbaciones marcadas en el sistema resonador [4].

### **3.1.1.5 Modo de vibración.**

Un modo de vibración es un patrón o forma característica en el que vibrará un sistema mecánico. La mayoría de los sistemas tienen muchos modos de vibración y es la tarea del **análisis modal** determinar la forma de esos modos. La vibración de una estructura es siempre una combinación de todos los modos de vibración [2].

### **3.1.1.6 Vibraciones para el análisis de maquinaria.**

El mantenimiento predictivo aplica técnicas no destructivas en las máquinas para predecir cuándo requieren operaciones de reparación o cambio de piezas. Una de ellas, y quizás la más utilizada es el análisis de vibraciones, que sirve para determinar el estado de cada uno de los componentes de los equipos con el fin de programar las actividades de mantenimiento respectivas, sin afectar su operación [5].

### **3.1.1.7 Unidades de vibraciones en análisis de maquinaria.**

**Desplazamiento:** Es la distancia desde una posición de referencia o desde un punto de equilibrio, el desplazamiento se mide generalmente en mils (milésimos de pulgada), y el valor pico a pico se usa por convención [2].

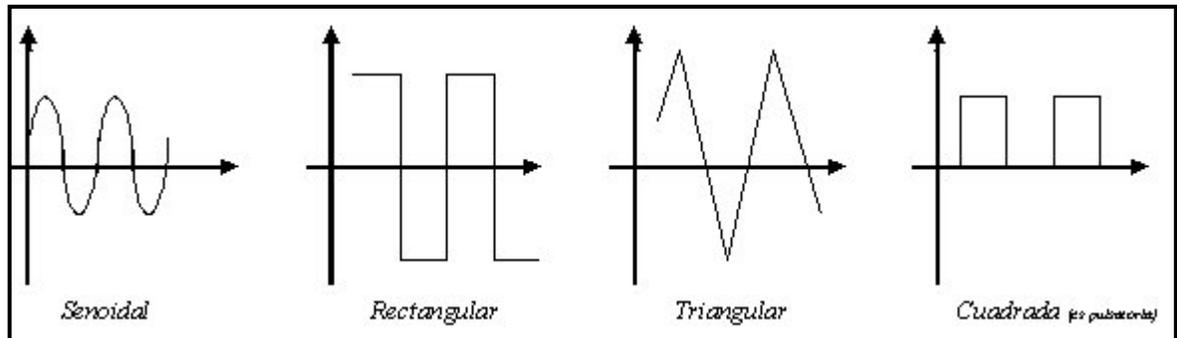
**Velocidad:** Se define como la proporción de cambio en el desplazamiento, generalmente se mide en pulgadas por segundo y la convención es de usar el valor pico o el valor Rms [2].

**Aceleración:** Se define como la proporción del cambio en la velocidad, su unidad es g (gravedad) en el sistema inglés, es la aceleración promedio debido a la superficie de la gravedad de la tierra [2].

### 3.1.1.8 Forma de onda.

La forma de onda es la forma de una señal en el dominio de tiempo como se ve en la pantalla de un osciloscopio. Es una representación visual o gráfica del valor instantáneo de la señal, trazado contra el tiempo como se muestra en la figura 3 [2].

**Figura 3.** Forma de onda



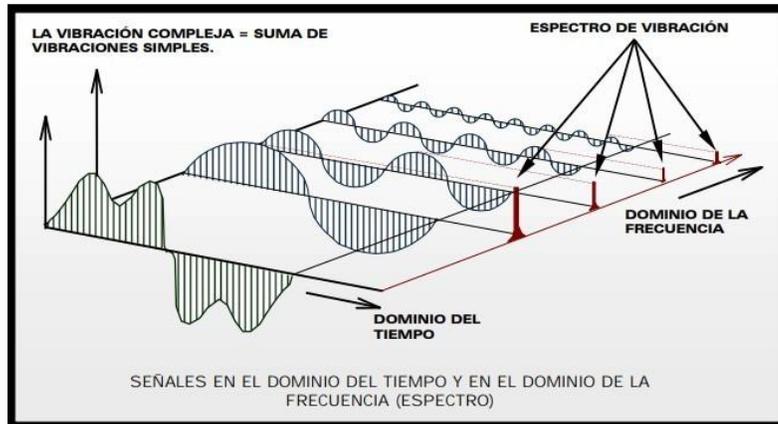
Tomado de: <https://ingenieriaelectronica.org/formas-de-onda-ondas-constantes-periodicas-y-no-periodicas/> [Consultado 07/11/2018].

### 3.1.1.9 Espectro.

Se define como la transformación de una señal, de la representación en el dominio del tiempo, hacia la representación en el dominio de la frecuencia, en donde por medio de la gráfica de Amplitud vs Frecuencia se realiza un análisis de vibraciones. Esta es la mejor herramienta que se tiene actualmente para el análisis de maquinaria [2].

En la figura 4 puede notarse claramente la señal compleja (en color verde), capturada desde una máquina. A dicha señal se le calculan todas las series de señales sinusoidales en el dominio del tiempo (vistas en azul) y por último se muestra cada una en el dominio de la frecuencia (vistas en rojo). La figura 4 muestra una señal en el dominio del tiempo (Forma de onda) y su correspondiente en el dominio de la frecuencia [3].

**Figura 4.** Espectro de vibración.



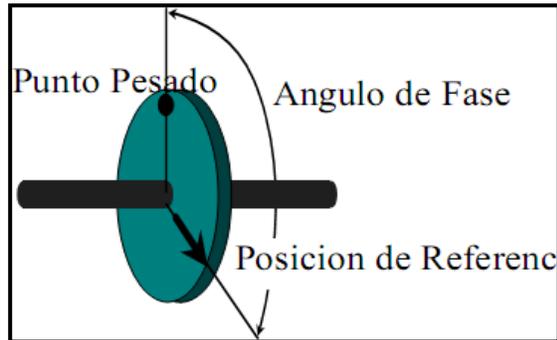
Tomado de: <<Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico>> A-MAQ S.A, enero de 2005. Disponible en: [http://www.mantenimientoplanificado.com/art%C3%ADculos%20PREDICTIVO\\_archivos/CURSO%20A%20MAQ.COM.pdf](http://www.mantenimientoplanificado.com/art%C3%ADculos%20PREDICTIVO_archivos/CURSO%20A%20MAQ.COM.pdf) [Consultada el 20 de octubre de 2018]

### 3.1.1.10 Fase.

Es una medida de la diferencia de tiempo entre dos ondas senoidales. Aunque la fase es una diferencia verdadera de tiempo, siempre se mide en términos de ángulo, en grados o radianes. Es una normalización del tiempo que requiere un ciclo de la onda sin considerar su verdadero periodo de tiempo [2].

El ángulo de fase entre dos señales indica la diferencia de tiempo que hay entre ellos, las señales pueden representar en cada caso vibración o fuerzas y su relación, determinando un punto pesado en el rotor para realizar el proceso de balanceo, para realizar la medición de fase, un impulsor disparador, debe generar un punto de referencia en el eje llamado "keyphaser". Este disparador puede ser generador por un tacómetro o por una clase de sonda óptica o magnética, que adquirirá una discontinuidad en el rotor (ver figura 5) [2].

**Figura 5.** Fase de un rotor

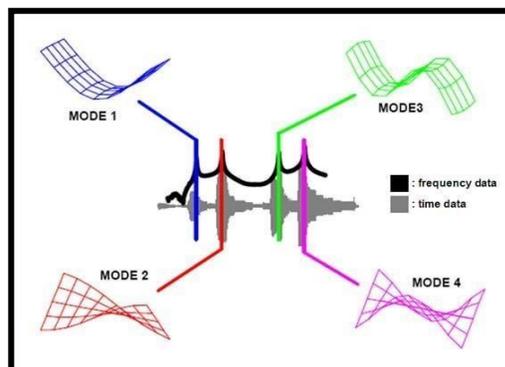


Tomado de: G. White, Introducción al análisis de vibraciones, Azima DLI, 1999-2010.

### 3.2 Análisis modal

El análisis modal es una técnica de análisis dinámico de estructuras. Tiene como objetivo la estimación de propiedades dinámicas como las frecuencias y los modos naturales al igual que el amortiguamiento. El análisis modal puede ser teórico o experimental. El teórico se basa en técnicas analíticas o simulaciones. El experimental se basa en ensayos y tiene 4 pasos fundamentales: Excitación de la estructura; medición mediante acelerómetros (ver figura 6); tratamiento digital y análisis de las señales y aplicación de modelos [6].

**Figura 6.** Modo de estructura de las formas



Tomado de: "LMS ENGINEERING INNOVATION" Disponible en: <http://www.lmsintl.com/modal-analysis> [Consultada el 20 de octubre de 2018].

### **3.2.1 ANSYS Workbench.**

ANSYS Workbench es un software el cual permite crear proyectos en análisis CAE con diferentes métodos, además brinda distintos despliegues gráficos simulando la ingeniería, establece vínculos entre fenómenos físicos y multi-física. Este incluye software y componentes físicos [7].

El programa realiza análisis de piezas usadas en ingeniería y diseño mecánico, también resuelve problemas físicos, que se encuentran con esfuerzos térmicos, fluidos, vibraciones y aplicaciones específicas [7].

### **3.2.2 Análisis modal de ANSYS.**

En análisis modal en Ansys Workbench establece las características de vibración (frecuencias naturales y formas de modo) de una estructura o componente de la máquina en su diseño. Por lo tanto, puede ser un punto de partida para análisis dinámicos con más aproximación, como los análisis dinámicos transitorios, de respuesta armónica o de espectro [8].

### **3.2.3 Usos para el análisis modal.**

Se utiliza para determinar las frecuencias naturales y las formas de modo en una estructura. Estas son parámetros significativos en el diseño de estructuras para cargas dinámicas. Así mismo, son útiles para realizar análisis de espectro, superposición armónica o transitoria de modo [8].

### **3.2.4 Comandos utilizados en un análisis modal.**

Se utiliza el mismo conjunto de comandos para fabricar un modelo y realizar un análisis modal. Por consiguiente, elige opciones equivalentes de la interfaz gráfica del usuario (GUI) para crear y resolver modelos, autónomos del tipo de análisis a realizar [8].

### **3.2.5 Resumen de los pasos en un análisis modal.**

La forma para un análisis modal reside en cuatro pasos principales [8]:

1. Construye el modelo.
2. Aplicar cargas y obtener la solución.
3. Expandir los modos.
4. Revise los resultados.

## **3.3 LabVIEW**

LabVIEW es un software de ingeniería diseñado para aplicaciones que requieren pruebas, medidas y control con acceso rápido a información de datos y hardware [8].

Los programas de LabVIEW son llamados instrumentos virtuales o VIs ya que su apariencia y operación generalmente imitan a los instrumentos físicos, como osciloscopios y multímetros. LabVIEW contiene una extensa variedad de herramientas para adquirir, analizar, visualizar y almacenar datos, así como herramientas para ayudarle a solucionar problemas en el código que escriba [9].

## **3.4 Variador de frecuencia.**

Un variador de frecuencia es un regulador industrial que se localiza entre la alimentación energética y el motor. La energía de la red transita por el variador y

normaliza la energía antes de llegar al motor, para ajustar la frecuencia y la tensión de los requisitos del procedimiento [10].

Los variadores disminuyen la potencia de salida de una aplicación, como una bomba o un ventilador, con la ayuda del control de velocidad del motor, avalando que no funcione a una velocidad mayor a la necesaria [10].

**Figura 7.** Variador de frecuencia



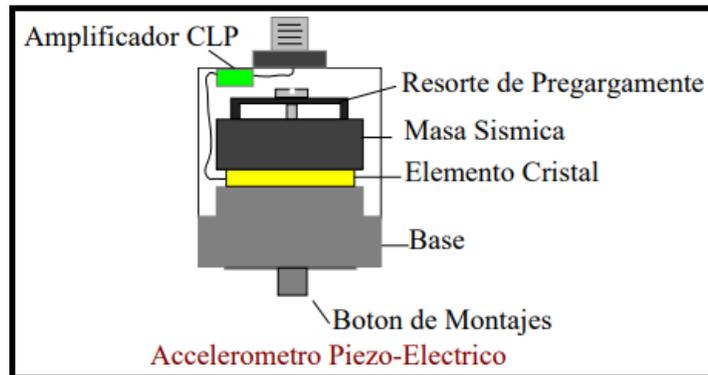
Tomado de: “Soluciones y servicios.biz” Disponible en: <https://www.solucionesyservicios.biz/ACS150-01E-06A7-2> [Consultada el 20 de octubre de 2018].

### **3.5 Sensor piezoeléctrico**

El acelerómetro piezo-eléctrico (figura 8) se considera como un transductor estándar para medir las vibraciones de una máquina. Se origina en varias configuraciones, pero la ilustración del tipo compresión, sirve para la operación. La masa sísmica está dominada a la base con un perno axial, que descansa en un resorte circular. El dispositivo piezoeléctrico está justo entre la base y la masa. Cuando la materia está detenida en la fuerza, se forma una carga eléctrica entre las superficies. En las más usadas se encuentra el cuarzo. Además, se encuentran materiales

Piezoeléctricos sintéticos que funcionan a temperaturas muy altas entre ellos es cuarzo. Si se aumenta la temperatura de un material piezoeléctrico, se llega al "punto curie" o " temperatura curie" y se disipa la propiedad piezoeléctrica. Inmediatamente que esto pasa, el transductor está defectuoso y no se puede reparar [2].

**Figura 8.** Sensor piezoeléctrico



Tomado de: G. White, Introducción al análisis de vibraciones, Azima DLI, 1999-2010

### **3.6 Mini-Shakers Modelos 2004E.**

Los mini-shakers electrodinámicos son agitadores de imanes permanentes y portátiles. Son perfectos para realizar pruebas de vibración de uso general de pequeños dispositivos y subconjuntos, o también como transductores de excitación para análisis modal, académica, biomédica o de laboratorio. Estos cuentan con sistemas de suspensión resistentes que implementan flexiones de armadura de hoja, elaborada de fibra de carbón [11].

**Figura 9.** Mini-Shakers Modelos 2004E



Tomado de: <http://www.modalshop.com/excitation/Mini-Shakers?ID=244>  
[Consultada el 20 de octubre de 2018].

### **3.9 Norma ISO 10816**

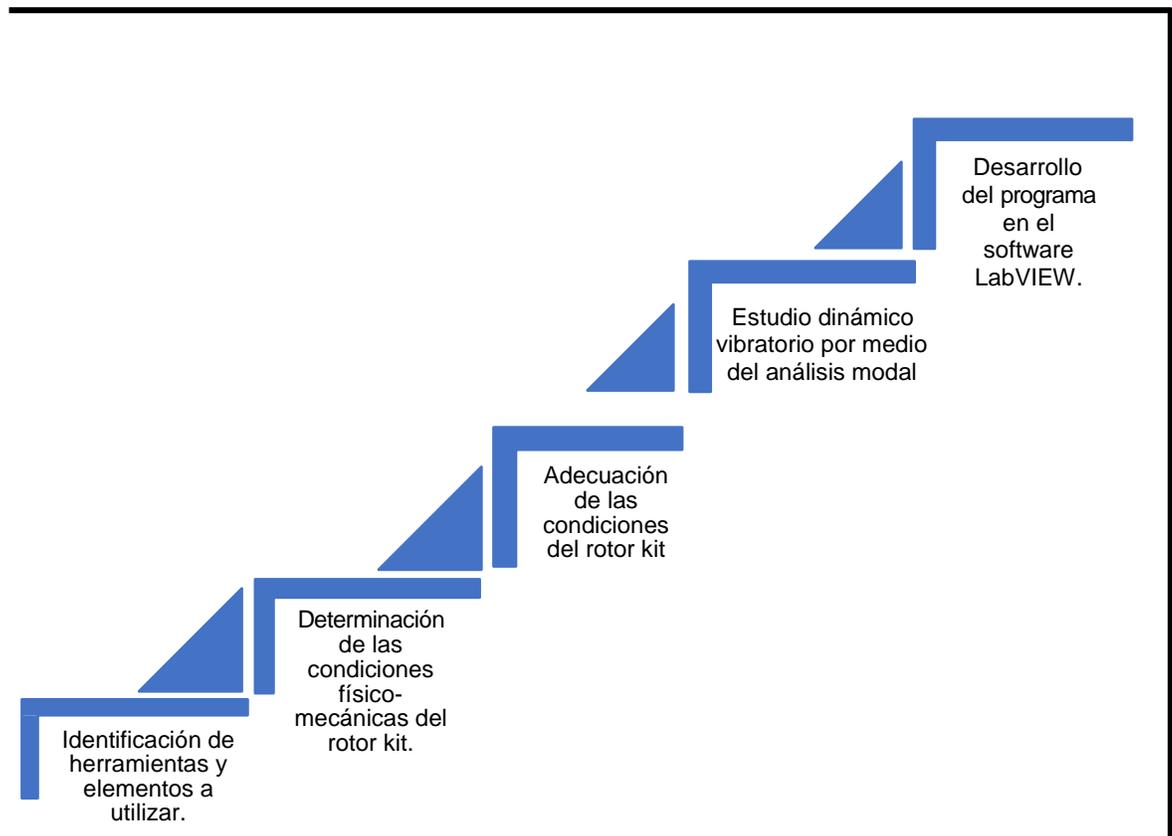
Establece las condiciones y procedimientos generales para la medición y evaluación de la vibración, utilizando mediciones realizadas sobre partes no rotativas de las máquinas. El criterio general de evaluación se basa tanto en la monitorización operacional como en pruebas de validación que han sido establecidas fundamentalmente con objeto de garantizar un funcionamiento fiable de la máquina a largo plazo. Esta norma reemplaza a las ISO 2372 e ISO 3945, que han sido objeto de revisión técnica. Este estándar consta de cinco partes[12]:

- Parte 1: Indicaciones generales.
- Parte 2: Turbinas de vapor y generadores que superen los 50 MW con velocidades típicas de trabajo de 1500, 1800, 3000 y 3600 RPM.
- Parte 3: Maquinaria industrial con potencia nominal por encima de 15 kW y velocidades entre 120 y 15000 RPM.
- Parte 4: Conjuntos movidos por turbinas de gas excluyendo las empleadas en aeronáutica.

- Parte 5: Conjuntos de máquinas en plantas de hidrogenación y bombe

## 4. METODOLOGÍA

**Figura 10.** Procedimiento metodológico



### 4.1 Identificación de herramientas y elementos a utilizar

Para llevar a cabo el proyecto, se reconocieron las herramientas, equipos y elementos a usar, donde se conoció y aprendió su uso y manipulación. Así, como también se identificaron los elementos faltantes para buscar su obtención. De esta manera los componentes generales que se requirieron en el proyecto fueron: los

sensores, una tarjeta de adquisición de datos, un banco de pruebas rotor kit y la plataforma virtual LabVIEW.

#### **4.2 Determinación de las condiciones físico-mecánicas del rotor kit**

Para hacer uso del banco de pruebas, inicialmente se debe realizó una valoración de sus condiciones físicas y mecánicas, donde se reconoció anomalías en cuanto a piezas faltantes y estado de estas.

#### **4.3 Adecuación de las condiciones del rotor kit**

Una vez determinadas las condiciones físico-mecánicas del banco de pruebas, se procedió a su adecuación, realizando inicialmente una limpieza mediante un proceso de arenado a la base y los soportes verticales con la finalidad de eliminar impurezas, imperfecciones, óxidos y suciedades. Posterior a esto, se cambiaron las piezas en mal estado o faltantes. De igual forma, se colocó un eje acoplado al motor apoyado en dos soportes que en su interior cada uno con un rodamiento y se proseguió a instalar los dos sensores de vibraciones en cada uno de las dos bases de apoyo para finalizar la instrumentación.

#### **4.4 Estudio dinámico vibratorio por medio del análisis modal**

Al banco de pruebas rotor kit en las condiciones adecuadas de instrumentación, se le realizó un diseño mecánico dinámico haciendo uso del software SOLIDWORKS, donde se modeló cada una de las piezas que componen el banco de pruebas con la finalidad de reconocer adecuadamente el rotor kit. Posteriormente, se realizó un estudio dinámico del eje en el software ANSYS y de forma experimental para obtener el estudio de frecuencias natural.

#### **4.5 Desarrollo del programa en el software LabVIEW**

Para adquisición de datos vibratorios. En esta etapa se desarrolló un programa en el software virtual LabVIEW, por medio de la implementación de unos sensores en el banco de pruebas y la conexión de una tarjeta de adquisición datos, lo cual permitió obtener las vibraciones emitidas por el rotor kit y posteriormente poder realizar la programación del software.

## 5. ADECUACIÓN E INSTRUMENTACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS ROTOR KIT.

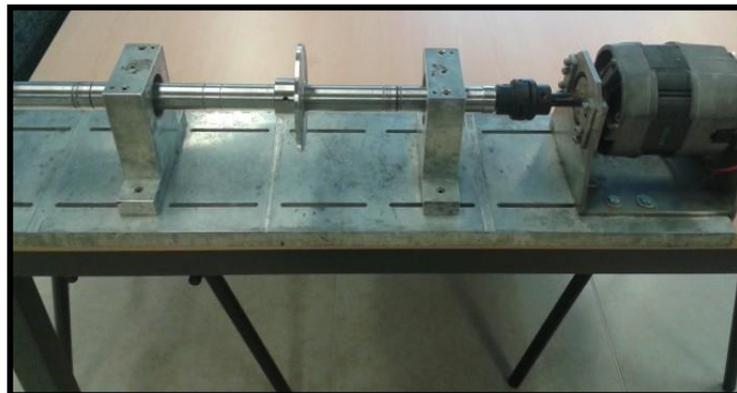
La adecuación e instrumentación del banco de pruebas rotor kit se realizó en dos etapas, mencionadas a continuación:

- **Adecuaciones Mecánicas:** se realizaron las mejoras y/o fabricación de las piezas requeridas para la construcción del rotor kit.
- **Instrumentación del banco de pruebas:** se hizo la selección e instalación de los elementos electrónicos más idóneos para el banco de pruebas rotor kit.

### 5.1. Adecuaciones Mecánicas

El laboratorio de vibraciones de la universidad contaba previamente con un banco de pruebas rotor kit, sin embargo, su motor no servía; adicionalmente, el gran tamaño de las camisas de los rodamientos y el eje, dificultaban la toma de datos por parte de los sensores y la simulación de las fallas en el banco rotor kit (Figura 11).

**Figura 11.** Banco de pruebas rotor kit previo.



Con la finalidad de adecuar el banco de pruebas para llevar a cabo el trabajo, se realizaron las siguientes actividades:

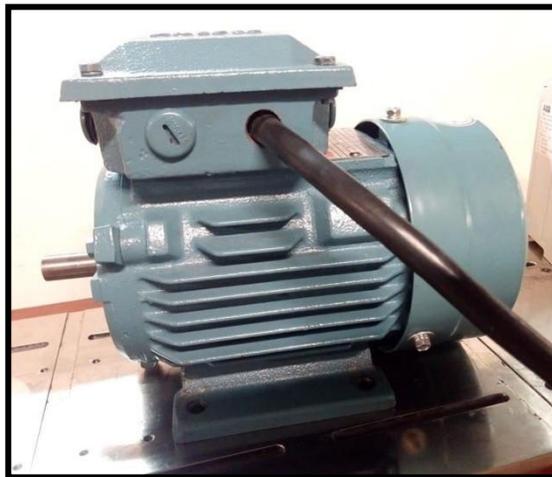
- Cambio e implantación de un sistema motriz.
- Desarrollo de soportes, rotores y eje.

### 5.1.1. Implementación de un sistema motriz.

Para el banco de pruebas se eligió un motor de 0,5 hp trifásico ABB serial M2QA71N2A, 60 hz, 3350 rev/min, proporcionado por la universidad debido a que no se requerían grandes cargas de funcionamiento.

Se vio la necesidad de acoplar un variador trifásico de velocidad de doble canal referencia ABB IP20/UL Open type, debido a que para evaluar las diferentes fallas del sistema mecánico se requieren modificar las rpm del motor (Figura 13).

**Figura 12.** Motor ABB serial M2QA71N2A, 60 hz, 3350 rev/min.



**Figura 13.** Imagen del variador ABB IP20/UL Open type



### 5.1.2 Desarrollo de soportes, eje y rotores (partes inducidas del banco de pruebas rotor kit).

Para la elaboración de las piezas, inicialmente se determinó que por precio/calidad el mejor material a usarse era el Acero 1020. Posteriormente, se realizó el diseño de las piezas en el programa solidwork para obtener sus planos. Finalmente, las piezas fueron maquinadas en el laboratorio de la Universidad Pontificia Bolivariana y posterior a esto fueron expuestas junto con la base a un tratamiento de cromado con el fin de protegerlas de la corrosión.

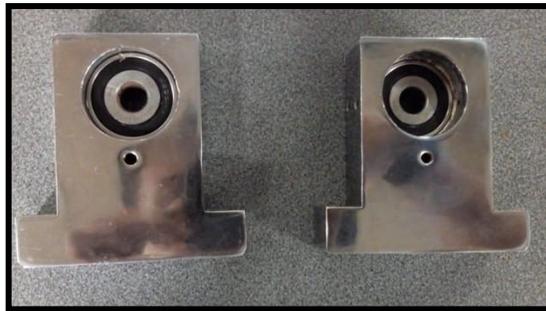
**Figura 14.** Eje de Acero 1020 de ½”



**Figura 15.** Rodamiento seleccionado Referencia 6203 2RSC3 1/2



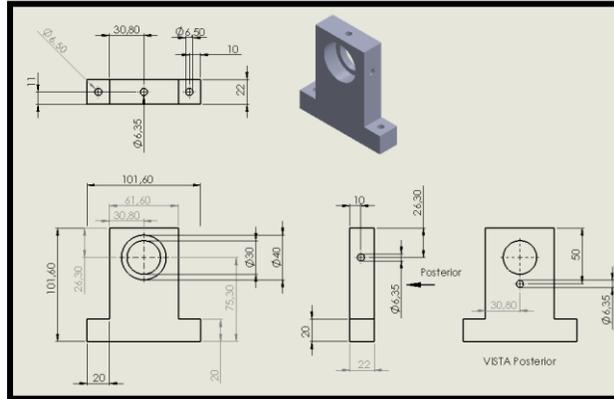
**Figura 16.** Camisa de los rodamientos fabricados en Acero 1020.



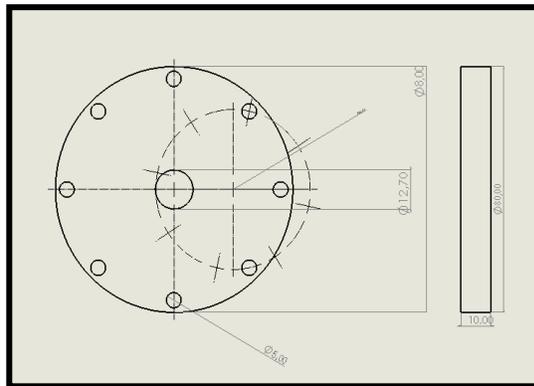
**Figura 17.** Rotores fabricados en Acero 1020.



**Figura 18.** Planos de las camisas de los rodamientos



**Figura 19.** Plano de los rotores



El ensamble del banco de pruebas se realizó con el eje, las camisas de los rodamientos y los rotores. Posteriormente se sometió a pruebas defuncionamiento utilizando un analizador de vibraciones industrial; las cuales arrojaron resultados de desalineamiento. (Figura 20).

**Figura 20.** Prueba analizadora de vibraciones.



Realizando el análisis de causas se determinó que este estaba siendo causado por las camisas de los rodamientos ya que estas piezas fueron hechas por procesos convencionales (Torno y fresa manual) lo que generó que no quedarán simétricas

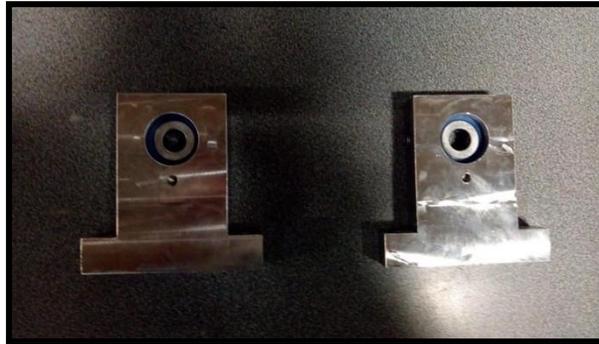
Como solución se planteó que estas piezas se fabricaron nuevamente en CNC y en acero inoxidable 304 como nuevo material de elección por sus propiedades (Figura 21), mayor vida útil y no tener que requerir ningún proceso adicional de recubrimiento, garantizando así su precisión. En la figura 22 se observan las piezas nuevas con este material.

**Figura 21.** Propiedades acero inoxidable

Unidades de las propiedades	Valor
Densidad g/cm <sup>3</sup> (lb/in <sup>3</sup> )	8,0 (0,29)
Modulo elástico GPa (10 <sup>6</sup> psi)	193 (28,0)
Resistencia eléctrica n Ω m	720
Calor específico J/kg*K (Btu/lb*F)	500 (0.12)
Conductividad térmica a 100 °C (212 °F) W/m*K (Btu/ft*h*F)	17,2 (9,6)
Rango de fusión °C (°F)	1400-1450 (2550-2650)

Tomado de: «INOXIDABLE SAE 304» Ferrocortes. [En línea]. Disponible: <http://www.ferrocortes.com.co/inoxidable-sae-304/> [Consultada el 20 de octubre de 2018] Disponible en: <http://www.inoxidable.com/propiedades1.htm> [Consultada el 20 de octubre de 2018]

**Figura 22.** Piezas finalizadas en acero inoxidable 304.



De igual forma, los rotores hechos previamente en acero 1020 eran bastante pesados y tendían a doblar el eje, lo que generaban un aumento significativamente alto en la 1x. Por lo tanto, se realizaron nuevamente con otro material (Grilon), siendo de menor peso (figura 23), pero con las mismas características requeridas para el buen funcionamiento del banco de pruebas rotor kit (tabla 1).

**Tabla 1.** Propiedades del Grilon.

PROPIEDAD	UNIDAD	NORMA	GRILON
DENSIDAD	g/cm <sup>3</sup>	ASTM D762	1.14
RESISTENCIA A LA TRACCION	kg/cm <sup>2</sup>	D638	630
ELONGACION	%	D638	60 - 300
MODULO DE ELASTICIDAD	kg.cm <sup>2</sup>	D638	1.88 X 10 <sup>4</sup>
DUREZA	----	D785	R 119
RESISTENCIA AL IMPACTO	ft.lb/in	D256	0.8-5.5
RESISTENCIA DIELECTRICA	Kvolt/mm	----	23
ABSORCION DE HUMEDAD 23°C A 60%	%	----	2.5
TEMPERATURA DE TRABAJO	°C	----	90*

Tomado de: «Propiedades del Grilon» Acernid, septiembre 2014. [En línea].

**Figura 23.** Rotores fabricados en Grilon.



## **5.2 Instrumentación del banco de pruebas**

La instrumentación del banco de pruebas se llevó a cabo mediante la selección e instalación de los diferentes elementos electrónicos que permitían la adquisición de las señales vibratorias.

Los elementos requeridos para la adquisición de las señales fueron los sensores.

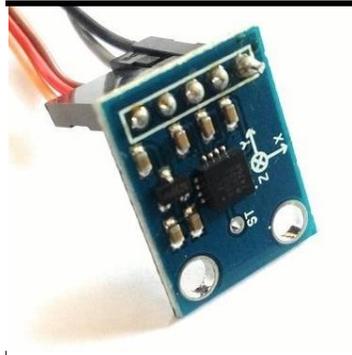
Para el banco del rotor kit se requerían dos tipos de sensores unos que midiera las vibraciones y el otro que midieran las RPM.

### **5.2.1 Sensores de las vibraciones.**

Como primera elección se usaron los sensores ADXL 335 por ser de bajo costo (Ver figura 24), los cuales fueron sometidos a pruebas de funcionamiento usando un mini shaker de marca modal shop referencia 2004E (Ver figura 28), para determinar su rango de trabajo, observando hasta que frecuencia se mantenía la forma senoidal

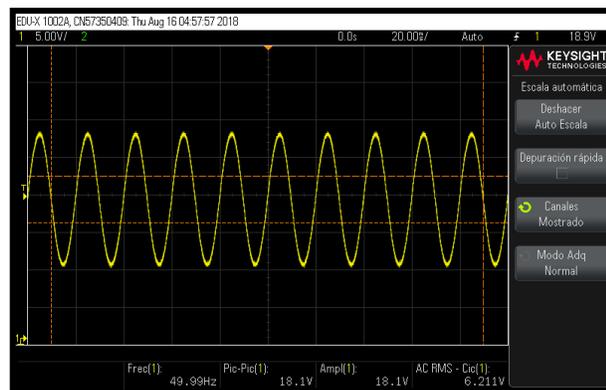
su respuesta, la cual fue leída mediante un osciloscopio. En las figuras 25,26 y 27 se observa la señal de salida a x hz a xh sxx.

**Figura 24.** Sensor ADXL 335

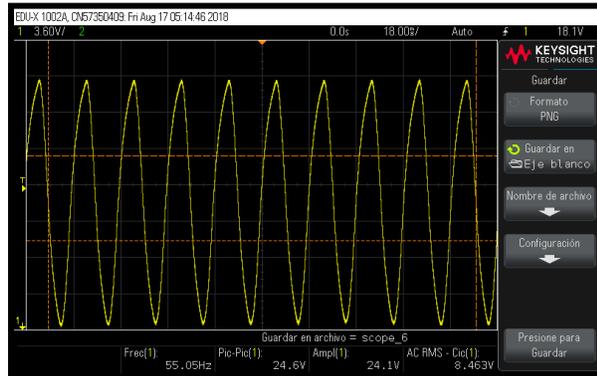


Tomado de: « Adxl335 Accelerometer » Indiamart, Julio 2014. [En línea].  
Disponibile en: <https://www.indiamart.com/proddetail/adxl335-accelerometer-14247616091.htm> [Consultada el 20 de octubre de 2018]

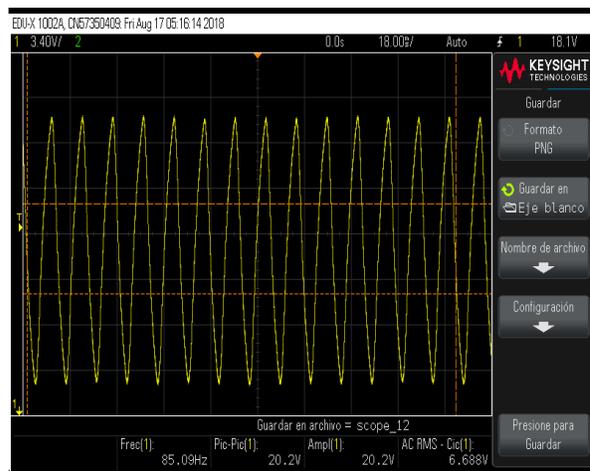
**Figura 25.** Osciloscopio prueba de sensor AXDL 335 a 50 Hz.



**Figura 26.** Osciloscopio prueba de sensor AXDL 335 a 55 Hz.



**Figura 27.** Osciloscopio prueba de sensor AXDL 335 a 85 Hz.



**Figura 28.** Mini Shaker de marca modal shop Modelo 2004E



Así mismo, para conocer la sensibilidad de los sensores fueron calibrados en un shaker 396C010 y se evaluó la linealidad de estos (figura 28).

**Figura 29.** Shaker ref 396C010

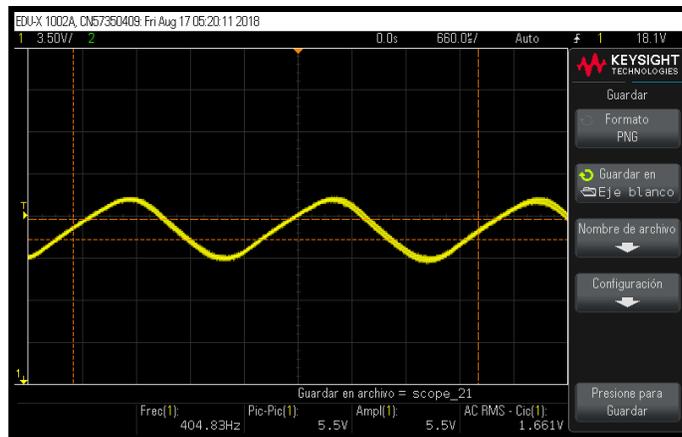


Como resultado las pruebas realizadas a los sensores ADXL mostraron que no eran los suficiente confiables cuando se operaban por encima de los 400 Hz como se muestra en la figura 31, 32 y 33, dando una lectura no exacta y también se observa que a medida que la frecuencia aumenta la sensibilidad disminuye de una manera no lineal, la variación no es consistente a distintas amplitudes. (tabla 1). En consecuencia, se decidió utilizar sensores acelerómetros convencionales IEP (figura 33).

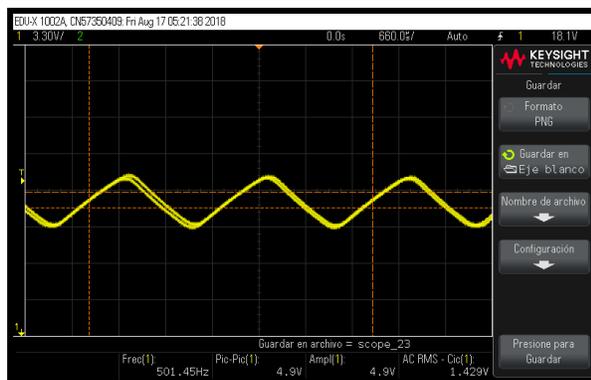
**Tabla 2.** Variación de la sensibilidad del sensor ADXL 335

Amplitud [G] de calibración	2 G	5 G	10 G
F [Hz]	Sensibilidad obtenida (mv/g)	Sensibilidad obtenida (mv/g)	Sensibilidad obtenida (mv/g)
10	26,7449167	27,4081809	31,4270087
15	24,878486	27,1070734	31,286796
30	20,8122501	23,2397023	28,105977
50	16,6736571	12,3564299	13,6668597
100	10,9313063	8,85279009	9,80646309
160	8,47642587	6,96715277	8,34931873
300	6,20181344	4,39685467	7,22207039
500	3,87157465	4,82857264	6,20442002
1000	2,78470695	4,79349671	5,91358938

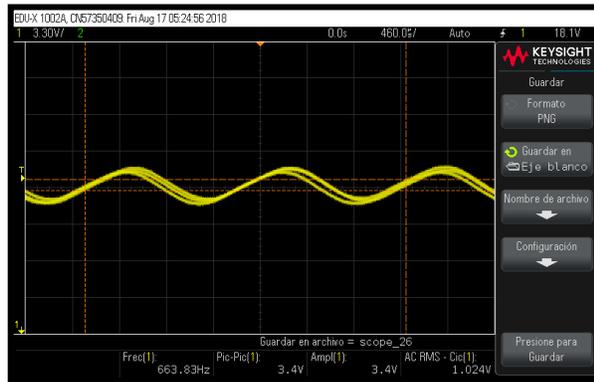
**Figura 30.** Forma de onda senoidal producida por el sensor ADXL 335 a los 400 Hz.



**Figura 31.** Forma de onda senoidal producida por el sensor ADXL 335 a los 500 Hz.



**Figura 32.** Forma de onda senoidal producida por el sensor ADXL 335 a los 663 Hz.



**Figura 33. Sensores IEP**



### 5.2.2 Sensor de Rpm

Para la medición de los RPM se requería de un sensor que midiera los RPM de la maquina; por tal motivo, se seleccionó un sensor OROS referencia OTAC-TAC-001( figura 34) perteneciente al laboratorio de vibraciones de la universidad.

**Figura 34. Sensor OROS referencia OTAC-TAC-O01**

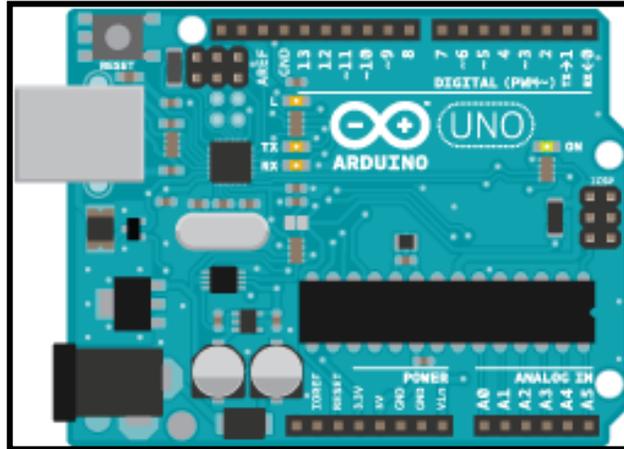


El sensor OROS referencia OTAC-TAC-O01 mide por medio de pulsos y tiene una salida BNC, este se adecuo por medio de una placa para que realizara la medición de los RPM de la máquina.

### **5.2.3 Sistema adquisición de datos**

Inicialmente cuando se seleccionaron los sensores ADLX335 se pensó en utilizar una tarjeta de adquisición arduino por su bajo costos (figura 35). Sin embargo, debido al cambio de sensores por IEP, se requirió de un sistema que fuera capaz de adquirir este tipo de señales, por tal razón se eligió la tarjeta NI 9234 perteneciente al laboratorio de vibraciones de la universidad. (Figura 36).

**Figura 35. Tarjeta adquisición arduino**



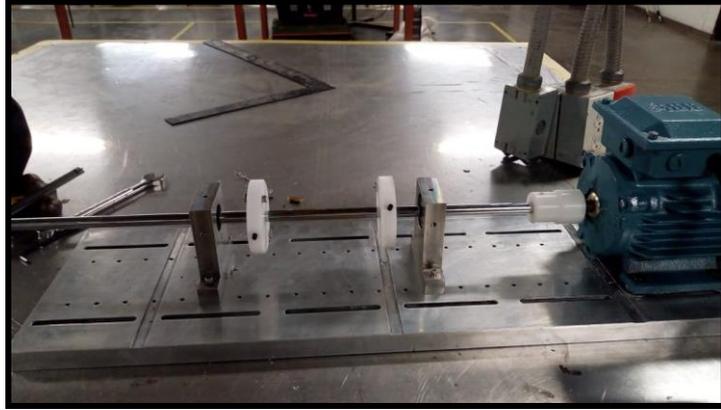
Tomada de: "Arduino" Julio 2014. Disponible en: <https://www.arduino.cc>  
[Consultada el 20 de octubre de 2018]

**Figura 36. Tarjeta NI 9234**



Una vez obtenidas todas las piezas completas se prosigue al montaje final e instrumentación completa del banco de pruebas rotor kit.

**Figura 37.** Banco de pruebas rotor kit.



## 6. ESTUDIO DINÁMICO VIBRATORIO POR MEDIO DE ANÁLISIS MODAL DEL EJE

El análisis modal se realizó por medio de dos metodologías las cuales se mencionan a continuación.

- Análisis modal experimental.
- Análisis modal usando software de elementos finitos.

A continuación, se describe el desarrollo de cada uno.

### 6.1 Análisis modal experimental

Inicialmente se realizó el montaje, usando un Mini-Shakers Modelos 2004E al cual se le acoplo un sensor de fuerza PCB 208C01 para obtener la excitación. Para medir la respuesta, se utilizó un acelerómetro PCB 352C68 el cual se distribuyó cada 20 cm del eje, es decir en 4 puntos de medición:

El montaje se hizo de forma libre para lo cual se utilizaron elementos elásticos. En la figura 38 se puede observar el mismo.

**Figura 38.** Montaje con Mini-Shakers 2004E

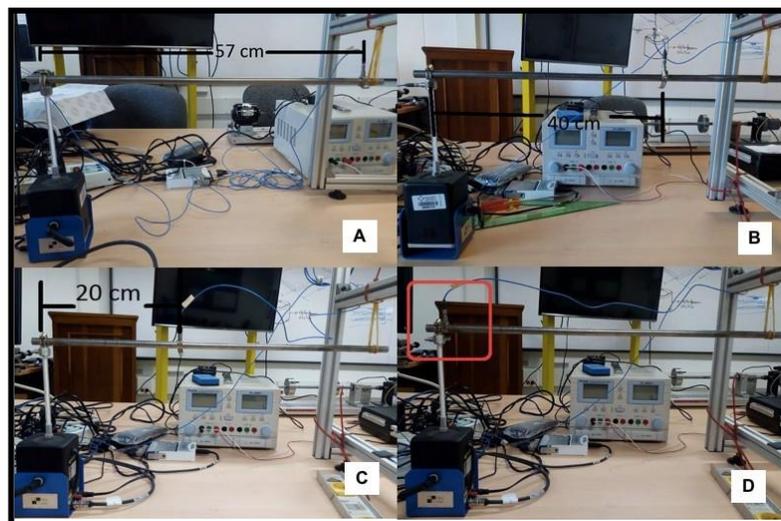
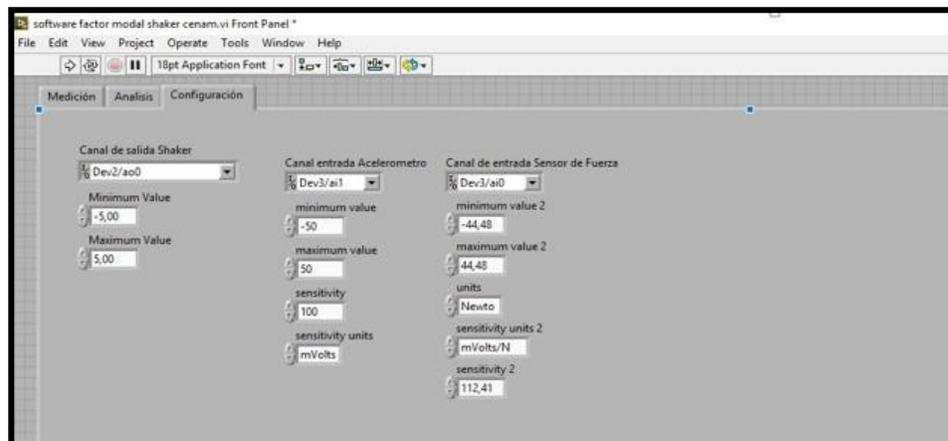


Figura A: Punto 1 A 57 cm; Figura B: Punto 2 a 40 cm; Figura C: Punto 3 a 20 cm; Figura D: Punto 4 sensores unidos.

Posteriormente se hizo la configuración del software de análisis modal experimental del laboratorio de vibraciones. Como se observa en la Figura 39.

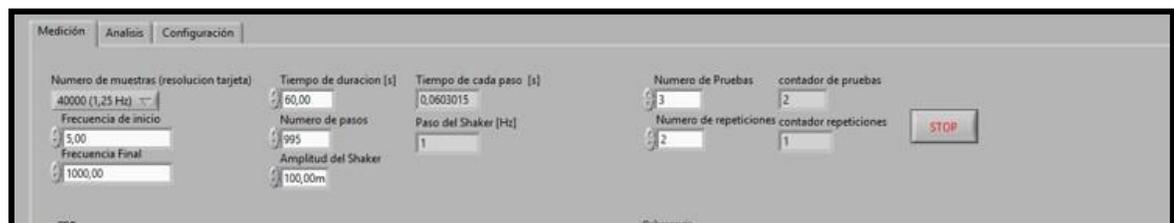
Se definieron los canales de entrada para la tarjeta NI 9234., donde se ingresó la sensibilidad para el sensor de fuerza, y el acelerómetro

**Figura 39.** Configuración plataforma del software.



Se realizaron 3 barridos y cada uno con tres repeticiones, en un rango de frecuencia de 5 Hz a 1000 Hz en el shaker, con amplitud de mi 100 mV (estas variables se definieron en el software). (Figura 40).

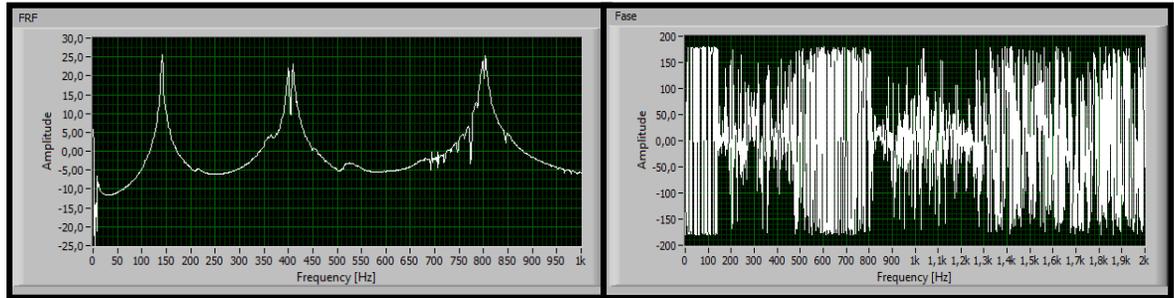
**Figura 40.** Configuración de pruebas.



En los resultados obtenidos continuación, se adjunta la amplitud de la FRF y la fase obtenida de cada uno de los puntos 1,2,3 y 4 donde se realizó la medición (Ver

Figuras 41,42,43 y 44) de los picos en amplitud de la acelerancia se obtuvo las frecuencias naturales.

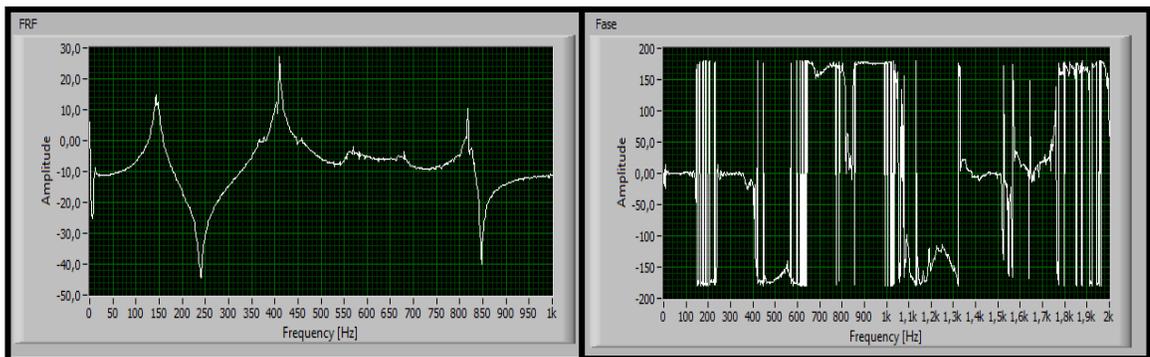
**Figura 41. Punto 1**



**Tabla 3. Resultado frecuencia naturales Punto 1.**

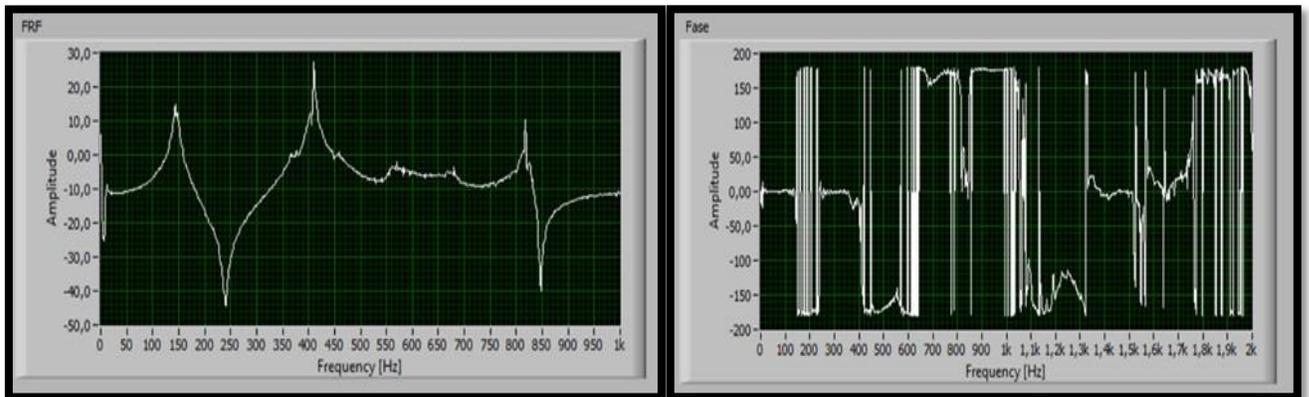
Prueba 1	Promedio	Barrido 1	Barrido 2	Barrido 3
<b>Modo de vibración 1</b>	141,25	141,25	141,25	141,25
<b>Modo de vibración 2</b>	408,75	408,75	408,75	408,75
<b>Modo de vibración 3</b>	803,75	802,5	803,75	803,75

**Figura 42. Punto 2**



**Tabla 4. Resultado frecuencias naturales Punto 2.**

<b>Prueba 2</b>	<b>Promedio</b>	<b>Barrido 1</b>	<b>Barrido 2</b>	<b>Barrido 3</b>
<b>Modo de vibración 1</b>	147,5	147,5	147,5	147,5
<b>Modo de vibración 2</b>	407,5	408,75	407,5	407,5
<b>Modo de vibración 3</b>	817,5	817,5	817,5	817,5

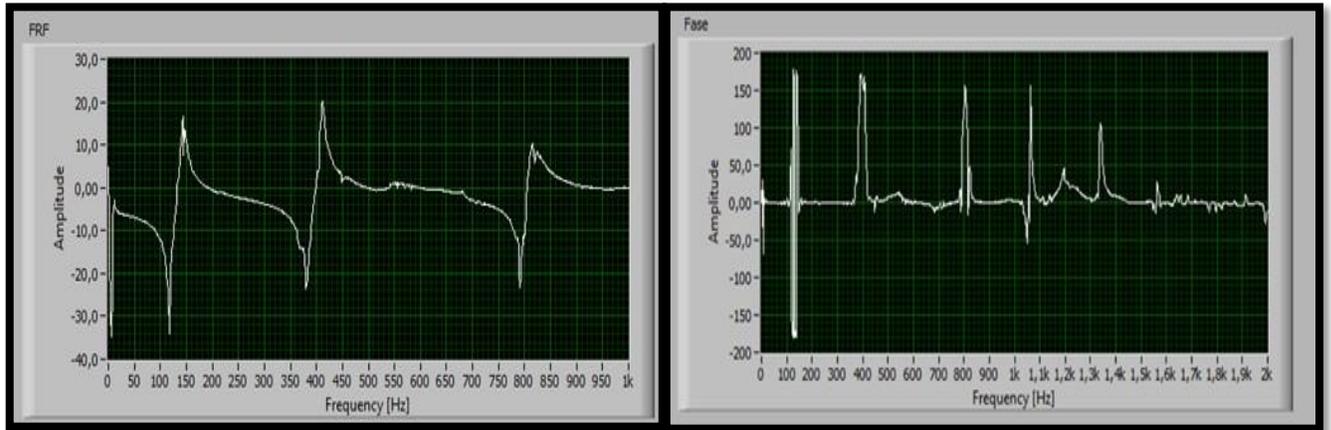


**Figura 43. Punto 3.**

**Tabla 5. Resultado frecuencia naturales Punto 3.**

<b>Prueba 3</b>	<b>Promedio</b>	<b>Barrido 1</b>	<b>Barrido 2</b>	<b>Barrido 3</b>
<b>Modo de vibración 1</b>	143,75	143,75	143,75	143,75
<b>Modo de vibración 2</b>	410	410	410	410
<b>Modo de vibración 3</b>	817,5	817,5	817,5	817,5

**Figura 44. Punto 4.**



**Tabla 6. Resultado frecuencias naturales punto 4.**

<b>Prueba 4</b>	<b>Promedio</b>	<b>Barrido 1</b>	<b>Barrido 2</b>	<b>Barrido 3</b>
<b>Modo de vibración 1</b>	143,75	143,75	143,75	143,75
<b>Modo de vibración 2</b>	411,25	411,25	411,25	411,25
<b>Modo de vibración 3</b>	816,25	828,75	816,25	816,25

Como se muestra en la tabla 6 se realiza un promedio de las cuatro pruebas del total de frecuencias naturales que representan totalmente el eje.

**Tabla 7. Análisis de resultados**

<b>Prueba exp 1 [Hz]</b>	<b>Prueba exp 2[Hz]</b>	<b>Prueba exp 3[Hz]</b>	<b>Prueba exp 4[Hz]</b>	<b>Promedio total exp [hz]</b>
141,25	147,5	143,75	143,75	144,0625
408,75	407,5	410	411,25	409,375
803,75	817,5	817,5	816,25	813,75

Como se observa en la tabla 7 las frecuencias naturales se encuentran a frecuencias más altas que la frecuencia de operación de la máquina por encima 150 Hz, esto se debe a que es un material metálico el cual tiene un alto módulo de elasticidad y rigidez, lo que hace que se obtengan frecuencias naturales altas, ya que el material

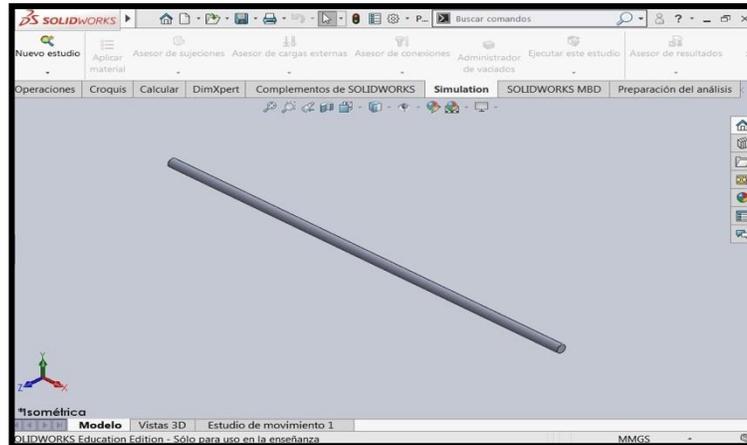
se opone a la vibración.

## 6.2 Análisis modal métodos de elementos finitos

Para el análisis modal se utilizó métodos de elementos finitos utilizando el software Ansys, el cual se configuró de la siguiente manera.

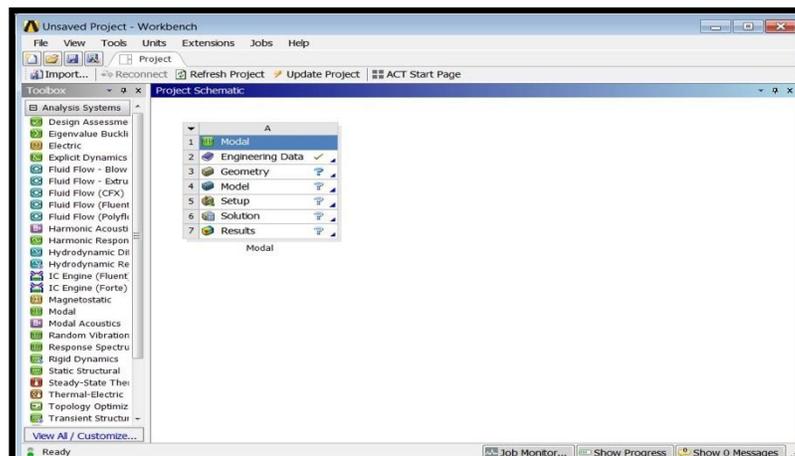
Inicialmente se diseña el modelo del eje en el software Cad solidworks. Con las medidas de 60 cm de longitud y 1/2" pulgada de diámetro (Figura 45).

**Figura 45.** Diseño del eje en Solidwork.



- I. En el software Ansys se seleccionó el tipo de análisis modal (figura 46).

**Figura 46.** Análisis modal



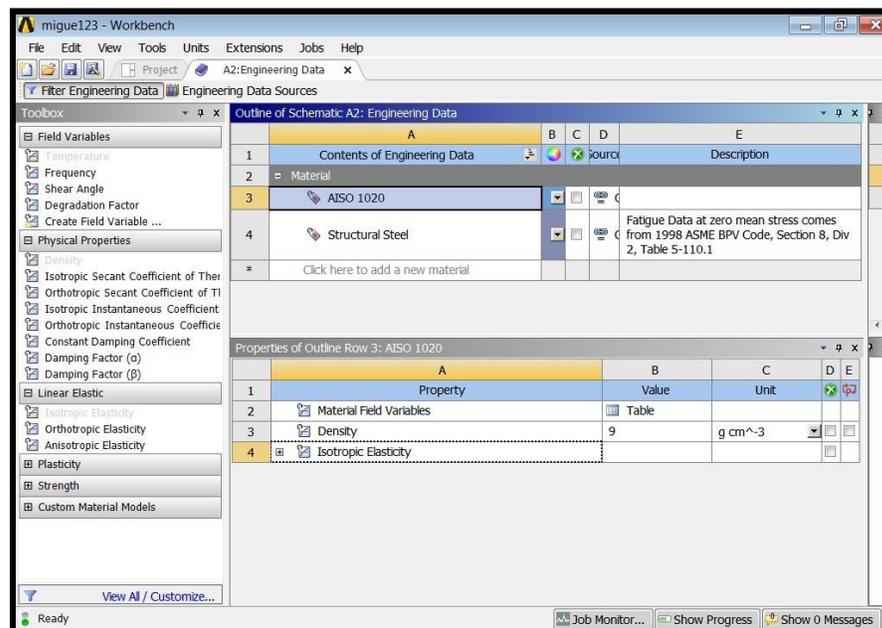
- II. Se crea el material en el Engineering Data según las propiedades del acero AISI 1020. Como se muestra en la Tabla 8 y en la figura 47.

**Tabla 8. Propiedades del material AISI 1020**

Propiedades del acero AISI 1020				
Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	Módulo de Young's [Gpa]	Coefficiente de Poisson	Shear modulus [Gpa]	Conductividad Térmica [W/m*°C]
7,87	207	0,29	80	52

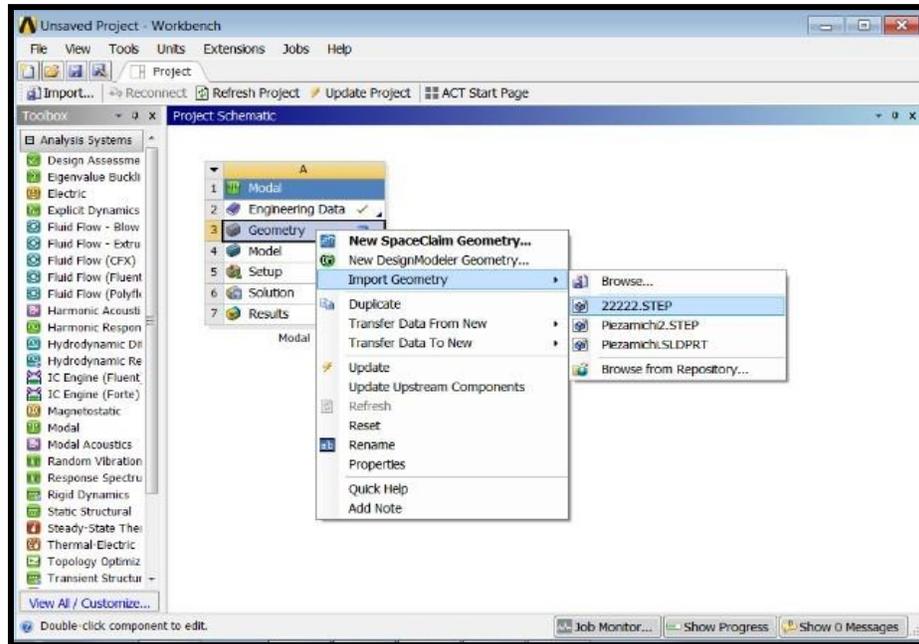
Tomado de: “Cia. General de Aceros S.A” Disponible en: <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/7826/VasquezTorresEdwinLibardo2013Anexos.pdf?sequence=2> [Consultado el 07/11/2018].

**Figura 47. Engineering Data**



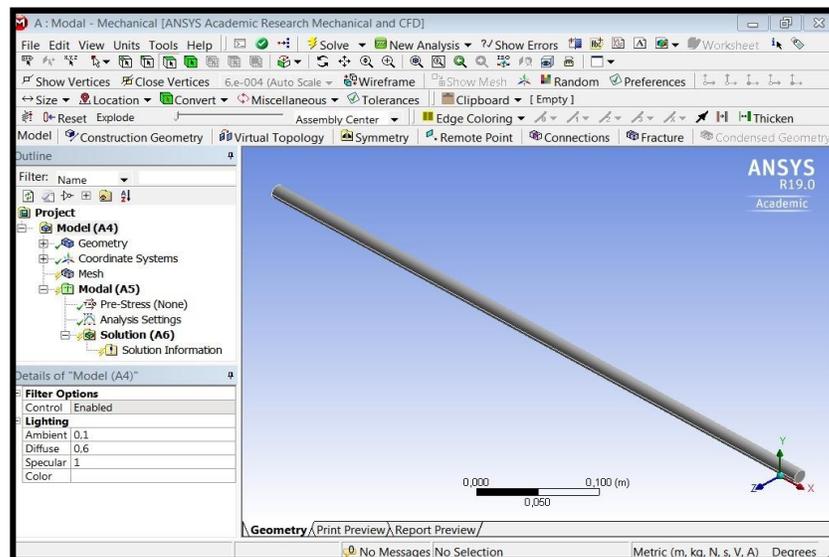
- III. Se importó la geometría de solidworks a Ansys se realizó en formato Step (figura 48).

Figura 48. Importación de geometría a Ansys Workbench.



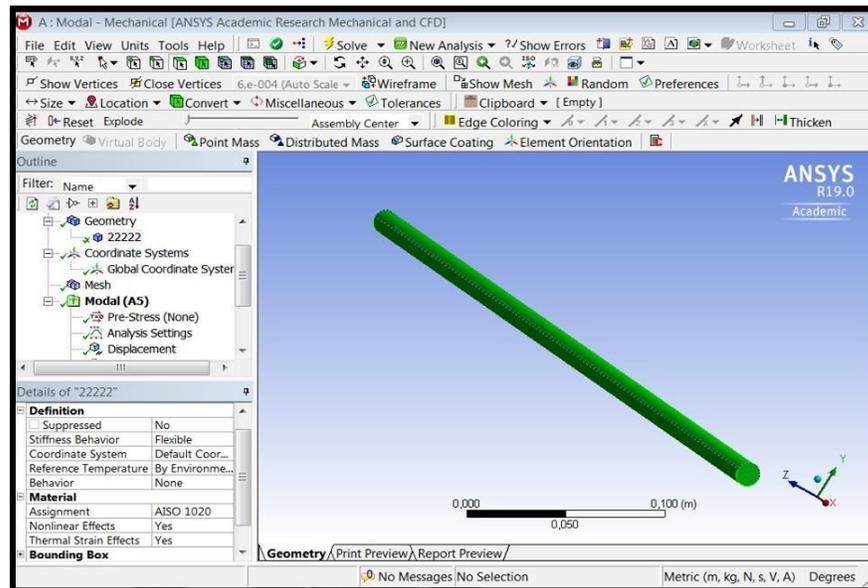
IV. Se seleccionó el modelo para realizar el análisis modal como se ve en la figura 49.

Figura 49. Selección Model



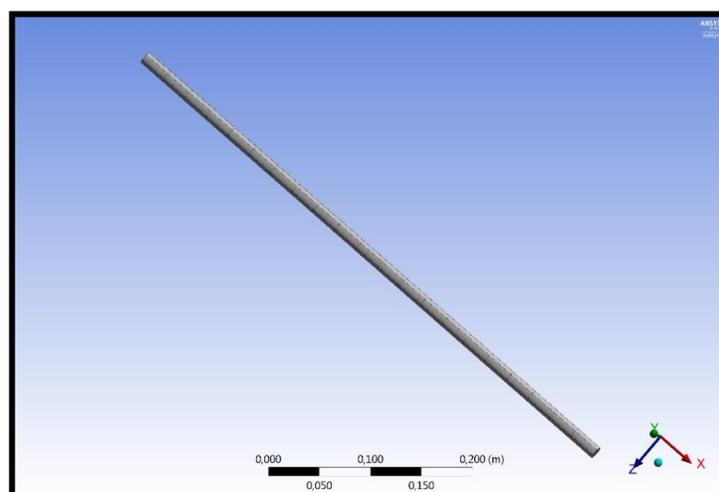
- V. En la sección de geometría se seleccionó el material creado anteriormente (figura 50).

**Figura 50.** Aplicación material del acero AISI 1020 a la pieza.



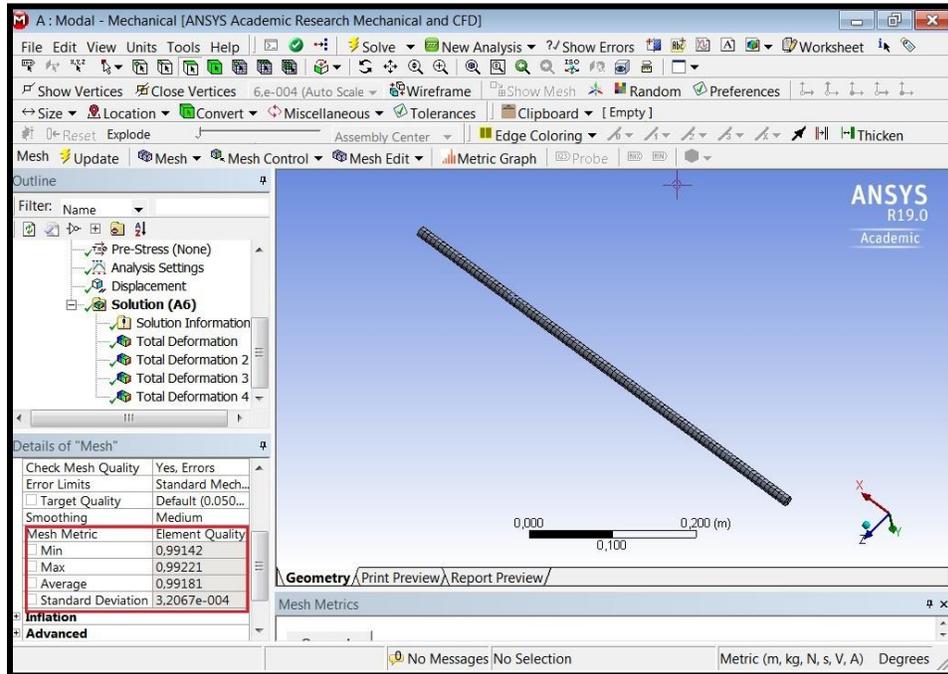
- VI. Se realizó el mallado automático por defecto de Ansys (figura 51).

**Figura 51.** Mallado automático de Ansys.



Debido a que la densidad del mallado era muy baja, se decidió realizar un mallado con en el 100% de relevancia, y mejorando la malla métrica al 99% como se observa en la figura 52.

**Figura 52.** Porcentaje de malla métrica.



- VII. Se aplicó una restricción de desplazamiento en el eje z. esto con el objetivo de evaluar los modos de vibraciones de flexión y torsión solo en el eje x y y. obteniendo las frecuencias naturales, para evaluar los primeros 20 modos de vibración (ya que no se conocía cuantos eran hasta 1000 Hz) (ver figura 53 y 54).

Figura 53. Restricción de desplazamiento del eje.

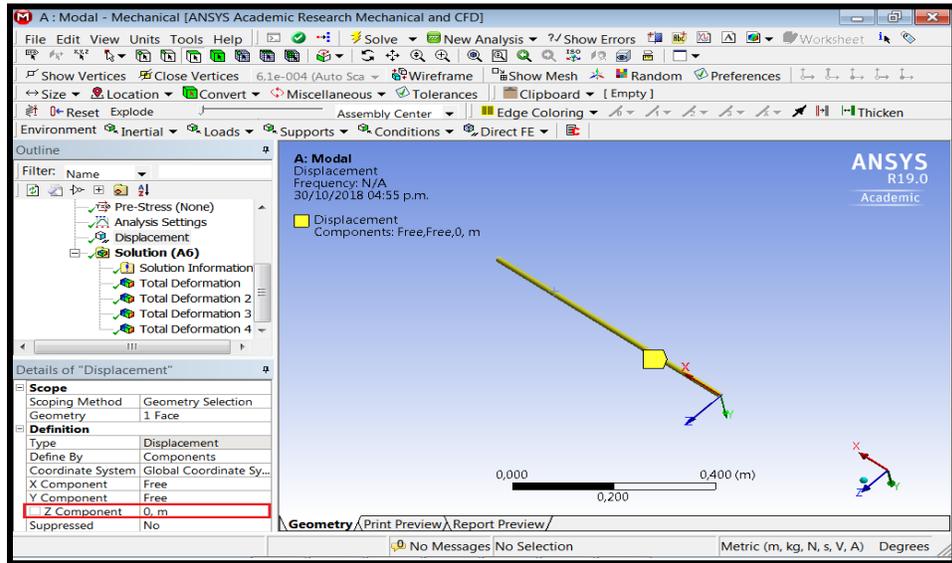
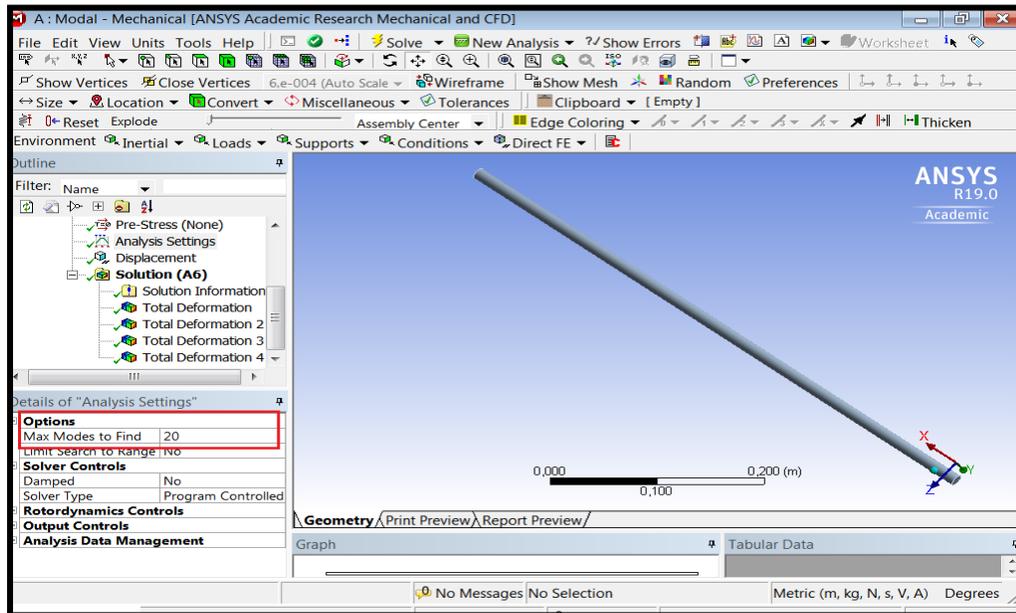
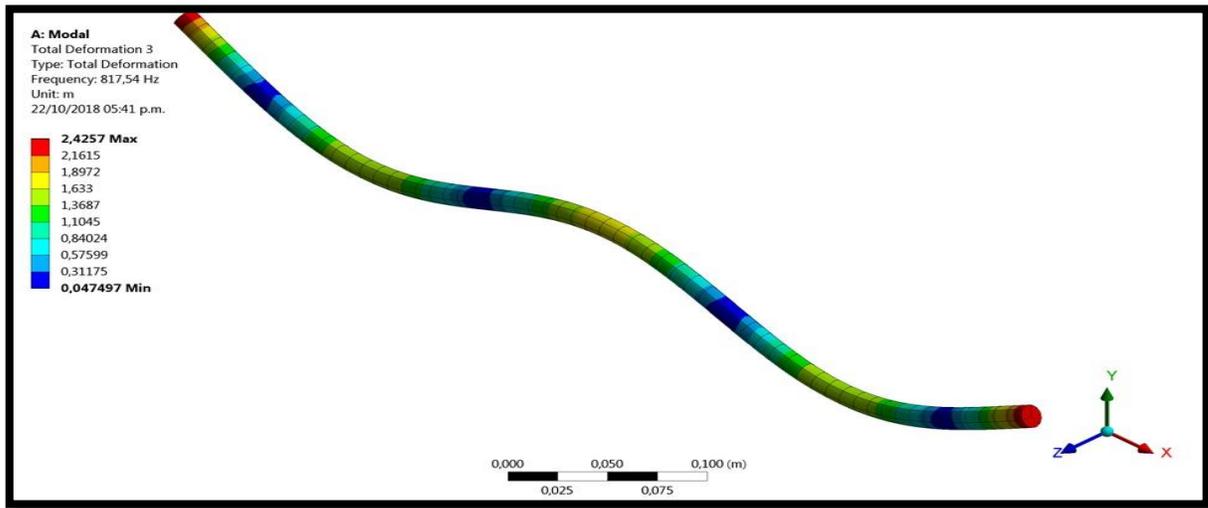


Figura 54. Selección de modos de falla.



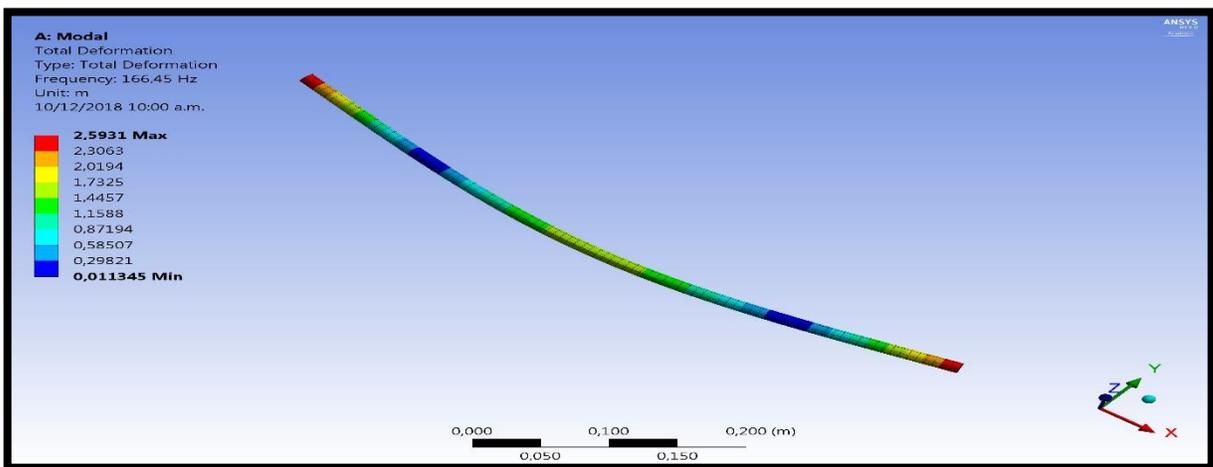
VIII. Se solucionó el modelo obteniéndose las frecuencias naturales.

Figura 55. Deformación total del eje.



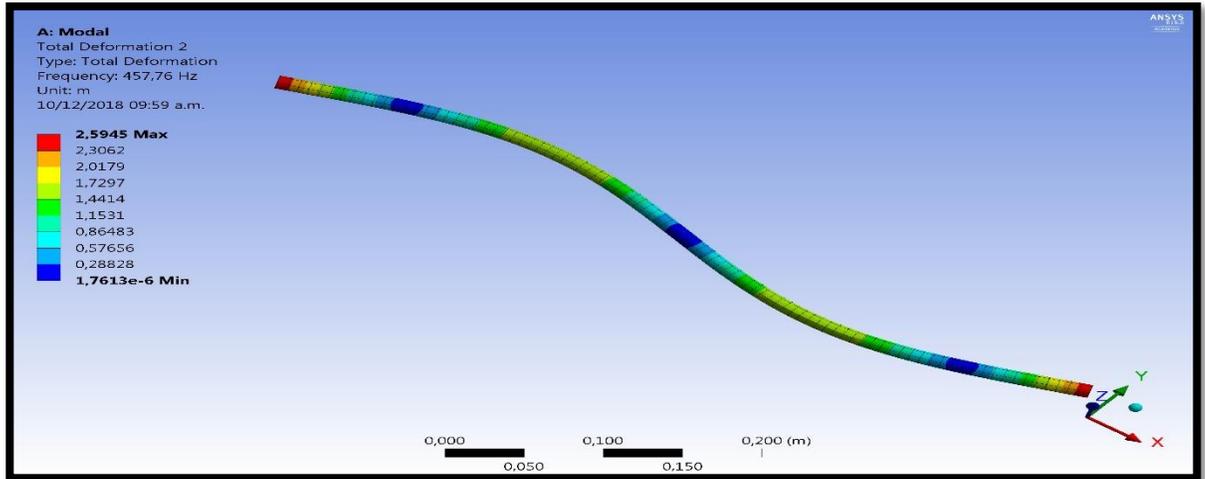
Los resultados de las frecuencias naturales que se obtuvieron son las siguientes (figura 56, 57 y 58):

Figura 56. Modo de vibración frecuencia natural 1.



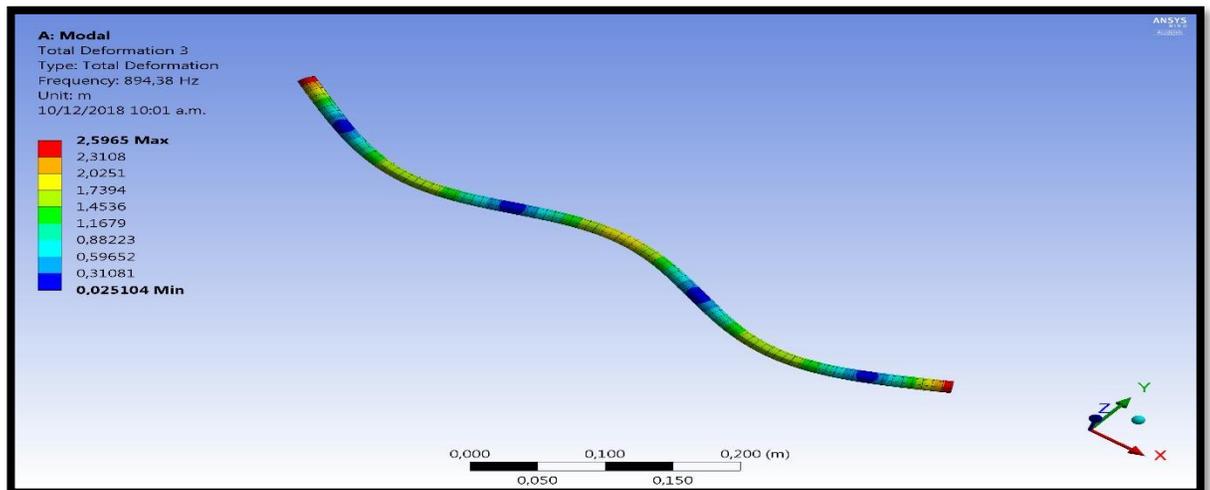
Frecuencia natural de [166 Hz].

**Figura 57.** Modo de vibración Frecuencia natural 2.



Frecuencia natural de [457,76 Hz].

**Figura 58.** Modo de vibración 3.



Frecuencia natural de [894,38 Hz].

Como se observa en la animación los modos de vibración son de flexión esto debido a que la geometría del eje es más larga que ancha.

A continuación, se adjunta el resultado de las frecuencias naturales obtenidas por software de elementos finitos en la tabla I9

**Tabla 9.** Resultado Simulación de frecuencias naturales.

<b>Modo de vibración</b>	<b>Frecuencia natural [Hz]</b>
1	166,45
2	457,76
3	894,38

### 6.3 Comparación

El error obtenido de las frecuencias naturales que se obtuvieron hasta los 1000 Hz por el método experimental colocando el eje a oscilación libre, y el método de elementos finitos a través del software Ansys Workbench fueron los siguientes (ver Tabla 10).

**Tabla 10.** Comparación de frecuencia naturales experimentales y Teóricas.

<b>Prueba exp 1 [Hz]</b>	<b>Prueba exp 2[Hz]</b>	<b>Prueba exp 3[Hz]</b>	<b>Prueba exp 4[Hz]</b>	<b>Promedio total exp [hz]</b>	<b>Prueba teorica [Hz]</b>	<b>% Porcentaje de error.</b>
141,25	147,5	143,75	143,75	144,0625	166,45	13,449985
408,75	407,5	410	411,25	409,375	457,76	10,5699493
803,75	817,5	817,5	816,25	813,75	894,38	9,0151837

Como se observa en la tabla 10 el porcentaje de error máximo originado en la comparación de promedios experimentales y teóricos es del 13% debido a que las propiedades del material se obtuvieron de tablas de la compañía general de aceros tomando como referencia el acero 1020, esto se debe a que no se conoce su composición química, ni el tratamiento térmico aplicado al material del eje.

El análisis modal aplicado por método experimental y método de elementos finitos en Ansys Workbench muestra que el eje seleccionado para el rotor kit no presenta afectaciones por frecuencias naturales elevadas, ya que el rotor kit tiene una frecuencia máxima de 50 Hz, lo cual no afecta al sistema mecánico.

## **7. DESARROLLO DE PROGRAMA EN LABVIEW.**

Para el desarrollo de un programa en labview primero se determinaron cual eran la información que se requería visualizar y se ordenaron en los siguientes grupos según su característica.

- Lectura inicial y parametrización de la señal (Determinar qué tipo de señal y los parámetros propios de cada sensor)
- Forma de onda (Forma generada por la aceleración)
- Balanceo (Rpm de la máquina y fase de la misma)
- Espectro (Determinar el espectro de la máquina y sus picos más relevantes)
- Velocidad (Determinación de la velocidad de la máquina y alertas de operación según la norma)

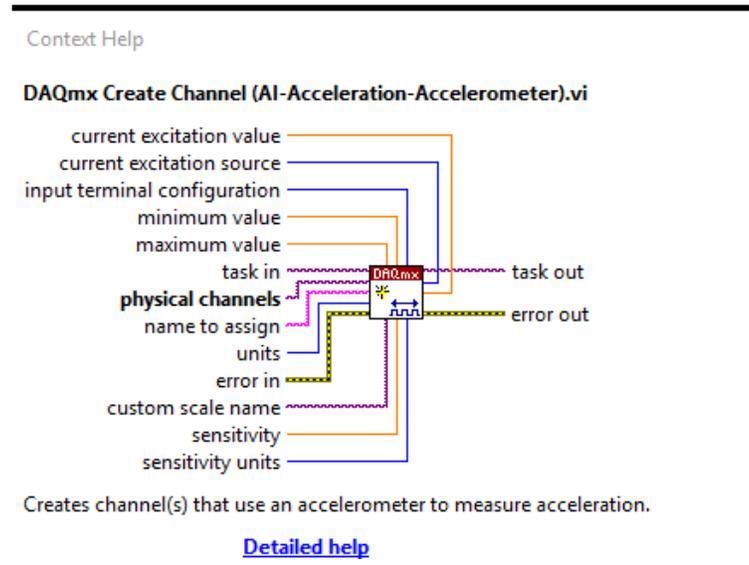
### **7.1 Lectura inicial y parametrización de la señal.**

Inicialmente, para configurar las entradas de los sensores se determinó que tipo de señal enviaban los sensores IEP y el sensor OROS referencia ORAC-TAC-O01; los sensores IEP emitían voltaje, pero debían ser alimentados (En el software labview se clasifica como aceleraciones) y el sensor OROS voltaje.

Una vez identificada el tipo de señal de los sensores, se prosiguió a programar con los bloques y su función.

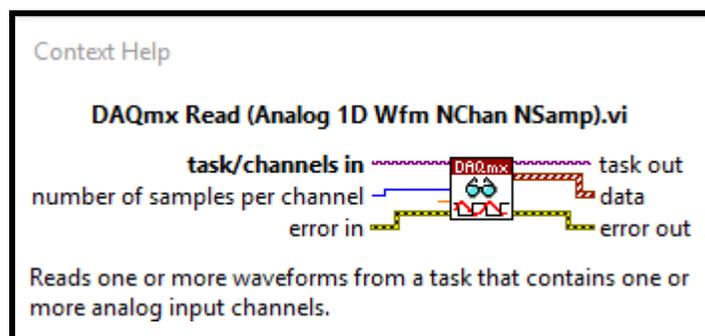
Se utilizaron los siguientes bloques y cada uno cumplió las funciones que se relacionan a continuación.

**Figura 59. DAQmx Create Channel**



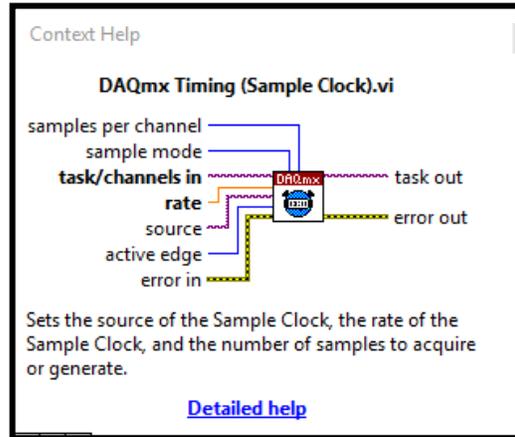
- **DAQmx Create channel:** Permitted to create the different channels of the NI 9234 and determine the parameters of this to measure acceleration or voltage depending on the case (figure 59).

**Figura 60. DAQmx Read.**



- **DAQmx read.** Reads the waveforms that are created by the DAQmx Create channel (figure 60).

**Figura 61.**DAQmx Timming



- **DAQmx Timing.** Determina cuantos ejemplos serán generador por cada canal y a qué velocidad serán leídos que en nuestro caso usamos una rata de muestreo de 1000 muestras por segundo (figura 61).

Este grupo de bloques da como resultado el menú de configuración, donde se parametrizan los sensores antes de iniciar el análisis como se muestra en la figura 62.

**Figura 62.** Menú de configuración de los canales y sus parámetros

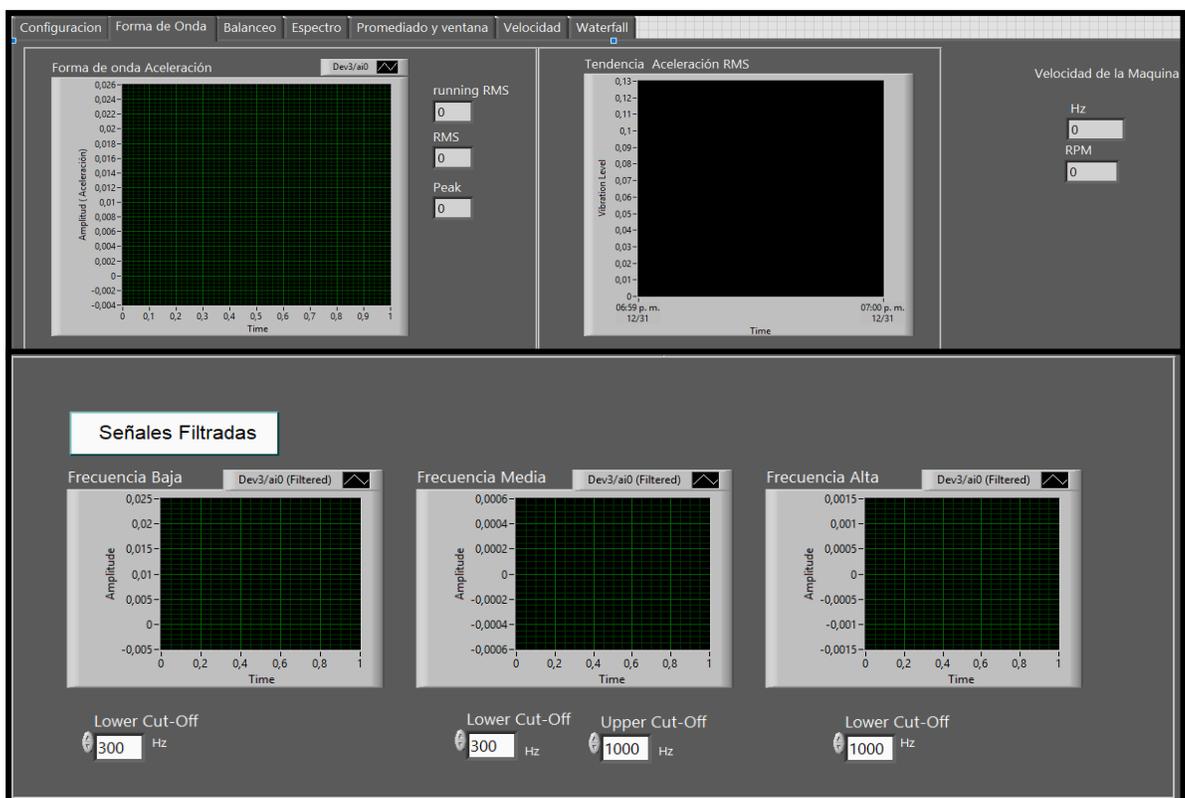


Este código programado del software se muestra anexo A

## 7.2 Forma de onda

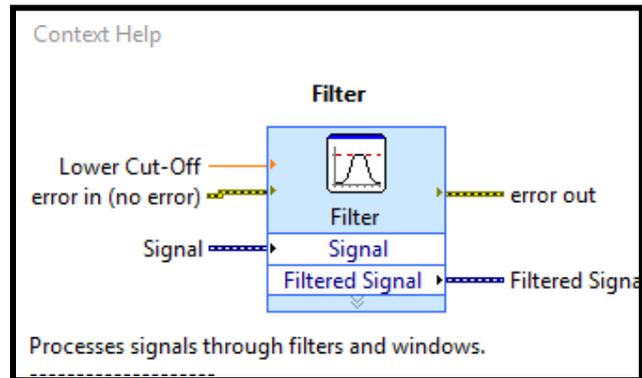
Luego se procede a la lectura de la forma de onda.

**Figura 63.** Pestaña forma de Onda



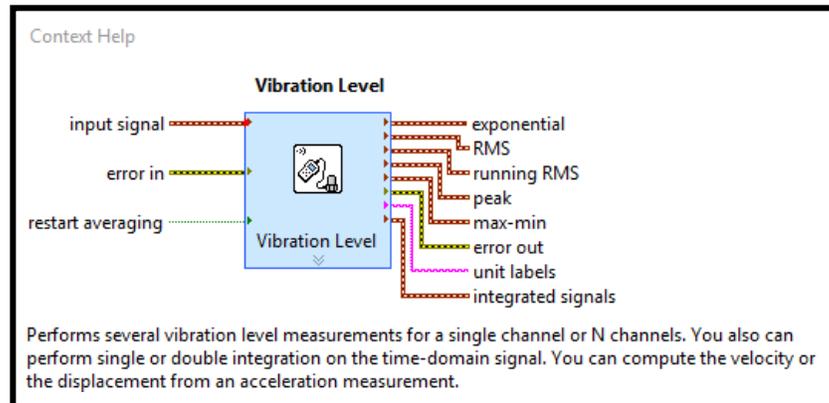
- La pestaña de forma de onda muestra aparte de la forma de onda de la aceleración también los RMS en el momento, el promedio de los RMS y la señal pico. La velocidad de la maquina en Hz y RPM y, por último, permite filtrar las señales para ver la forma de onda en distintas frecuencias (figura 63).

**Figura 64. Filtro**



- **Filtro.** Se usó con la finalidad de filtrar la señal esto con la finalidad de poder observar la forma de onda a menos de 300 Hz, mayor a 1000 Hz y entre 300 Hz y 1000 Hz. Pero los límites puedes ser seleccionados a una frecuencia determinada (figura 64).

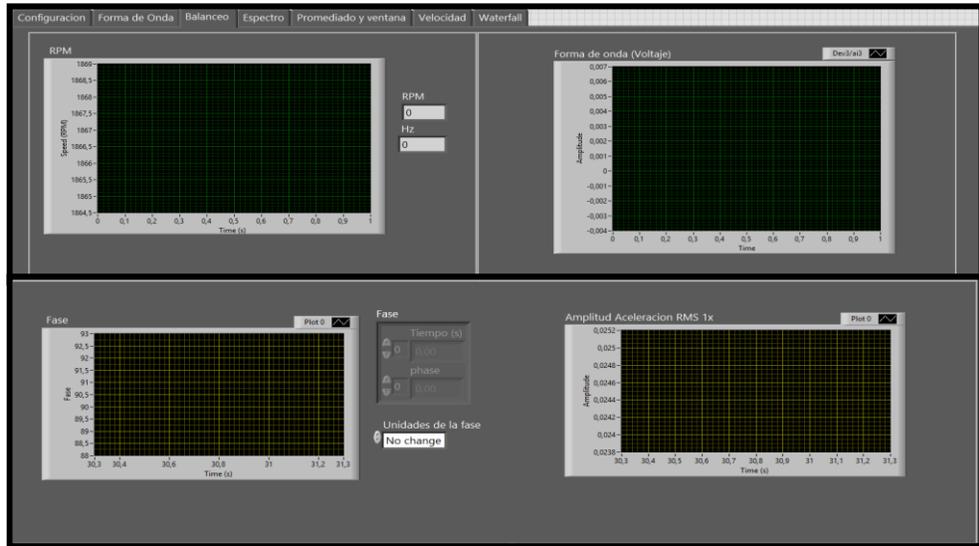
**Figura 65. Vibration level**



- **Vibration level.** Transforma la aceleración enviada por los sensores en valores de RMS promediados, RMS al instante y pico (figura 65).

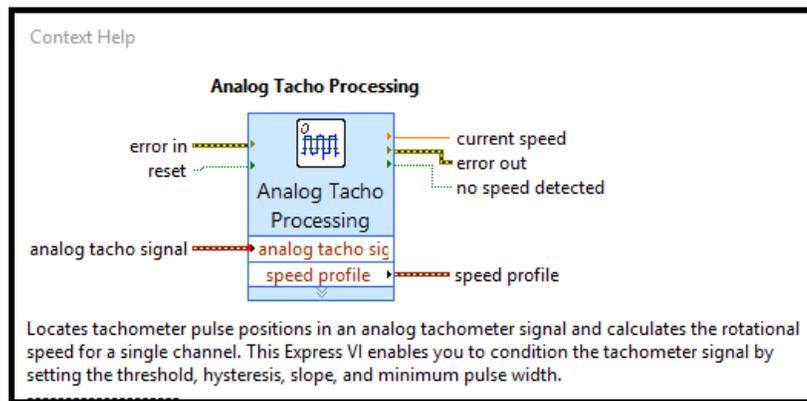
### 7.3 Balanceo

Figura 66. Pestaña balanceo



- La pestaña de Balanceo muestra los RPM de la máquina, así como la forma de onda en voltaje que envía el sensor sin ser procesada. Así mismo, muestra la fase que puede ser vista en distintas unidades y, por último, la amplitud de la aceleración en unidades RMS en la 1x (figura 66).

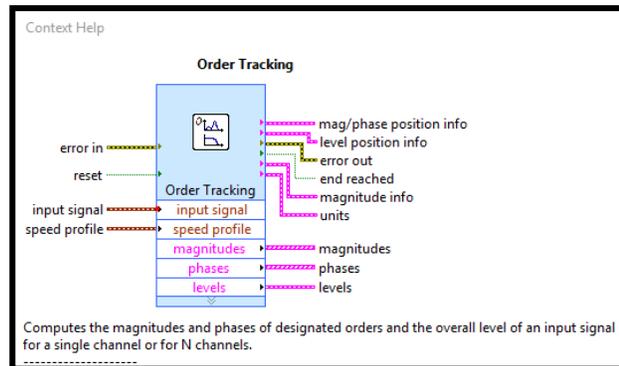
Figura 67. Analog Tacho Processing



- **Analog Tacho Processing.** Se Determina la forma de onda que tiene la señal que envía el sensor de voltaje que nos indica el RPM de la máquina,

dado que esta señal es en voltaje el cuadro Analog Tacho Processing, es el encargado de transformar ese voltaje en RPM (figura 67).

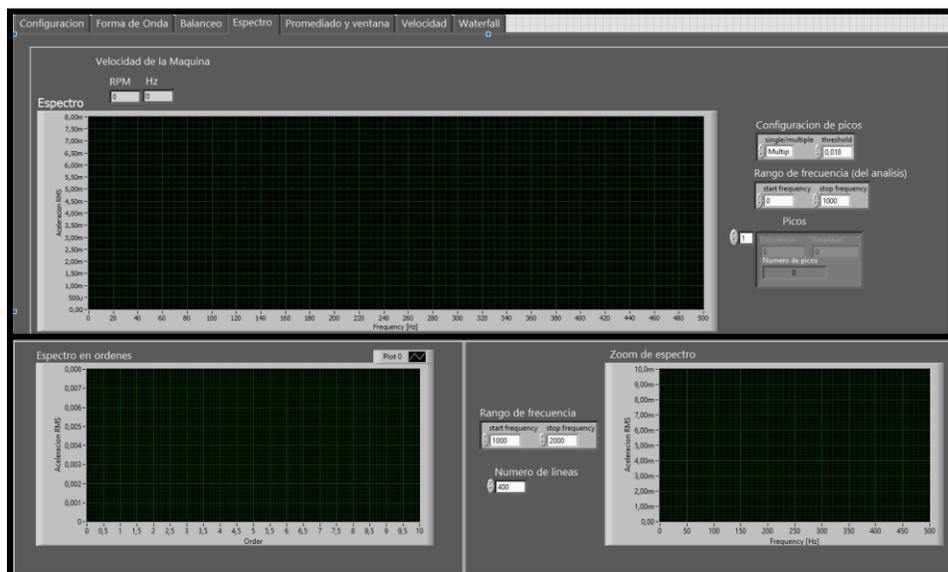
**Figura 68.** Order Tracking



- **Order tracking.** Determina la fase, para la cual se requieren de dos variables de entrada como lo son la velocidad de la maquina en RPM y la señal que es enviada por el acelerómetro (figura 68).

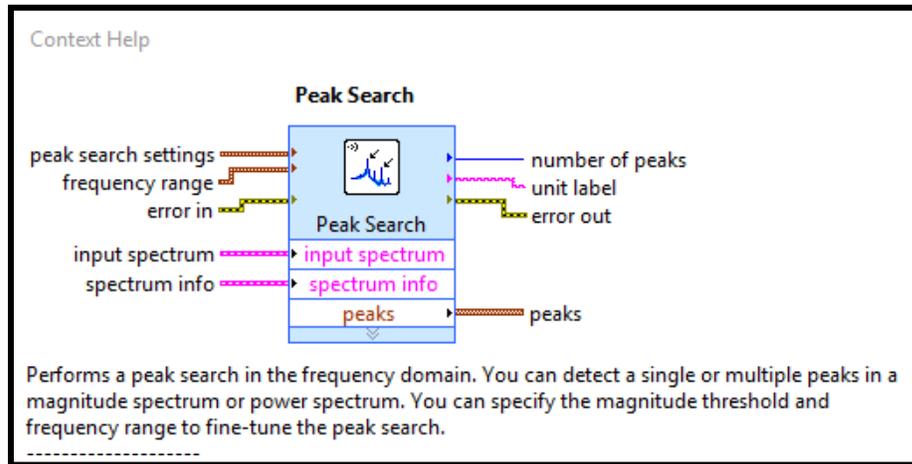
## 7.4 Espectro

**Figura 69.** Pestaña de espectro



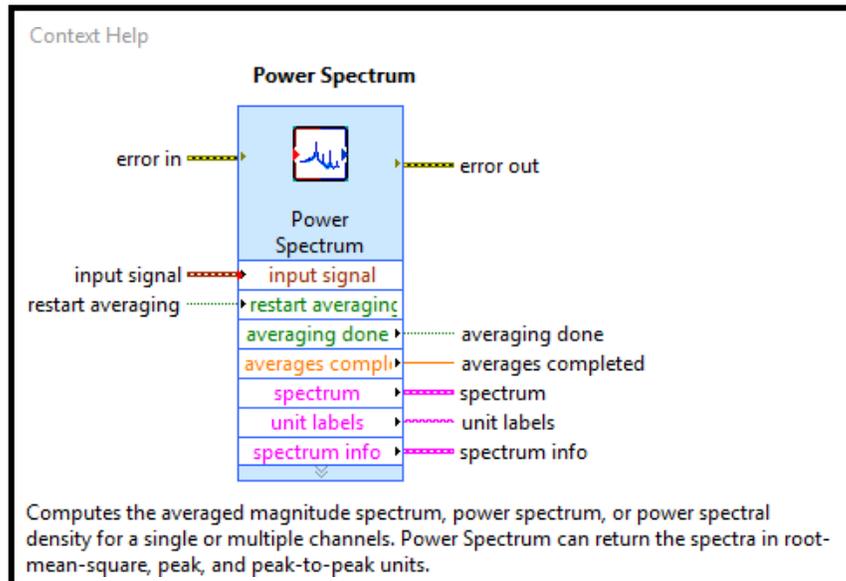
- La pestaña de espectro indica el modelo espectral de la onda, en el se pueden configurar el rango de frecuencia en el cual se desea observar, así como los diez primeros picos (figura 69).

**Figura 70. Peak Search**



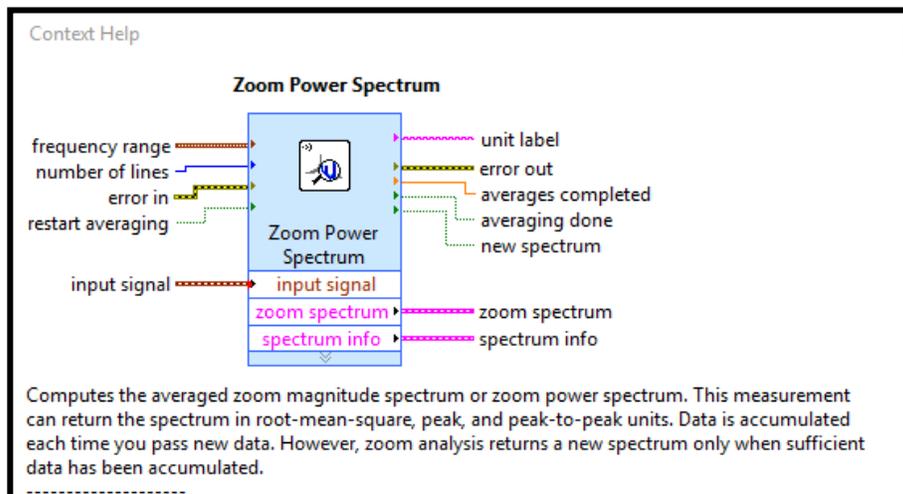
- **Peak search.** Es el encargado de determinar la cantidad de picos que se desea que sean representados con el fin de poder observar los más relevantes (figura 70).

**Figura 71. Power Spectrum**



- **Power Spectrum.** Es el encargado de generar el espectro de la forma de onda y toda la información proveniente de la misma (figura 71).

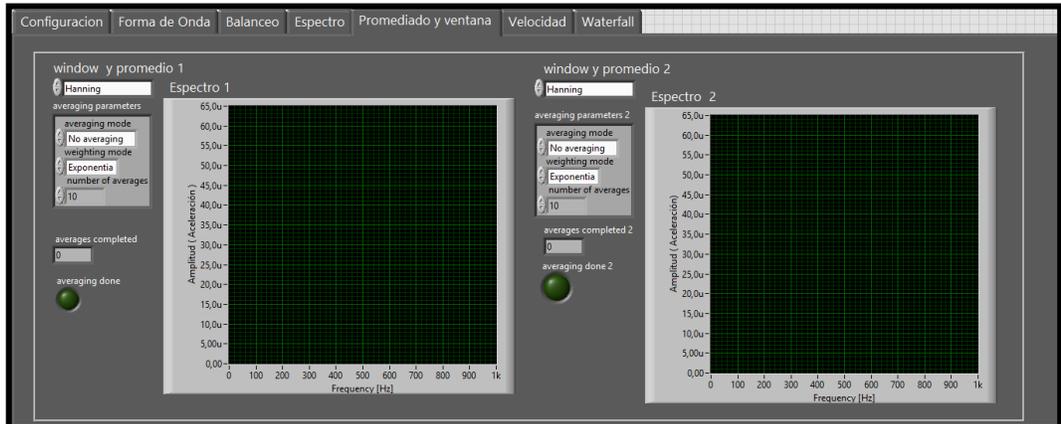
**Figura 72. Zoom Power Spectrum**



- **Zoom Power Spectrum.** Permite poder observar el espectro generado por la forma de onda el cual se puede modificar los rangos de mayor interés (figura 72).

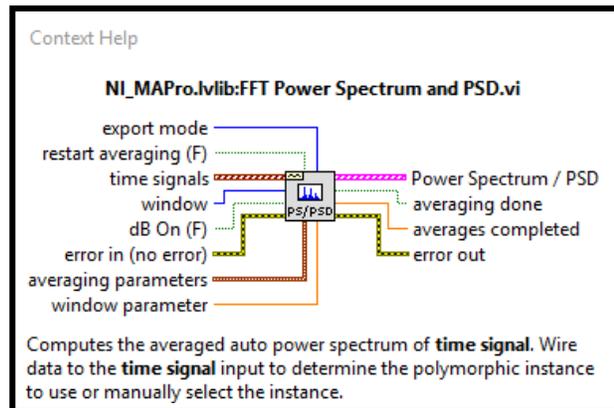
## 7.5 Promedio y ventanas

Figura 73. Pestaña promedio y ventana



- La pestaña de Promedio y ventanas indica una comparativa de dos modelos espectrales de onda visto por dos tipos de ventana distintos, así como también es posible que realicen un promedio (figura 73).

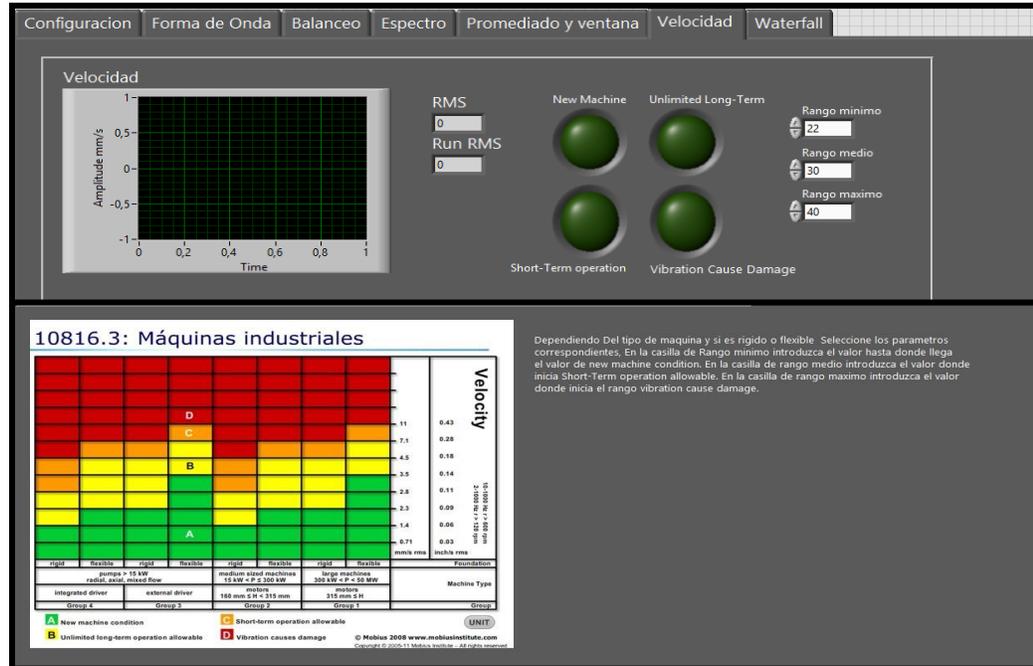
Figura 74. Power Spectrum and PSD



- **Power Spectrum and PSD.** Determina el modelo espectral al igual que en la pestaña de espectro, pero con la diferencia que aquí se permite que este sea representado en distintos tipos de ventana para realizar una comparación (figura 74).

## 7.6 Velocidad

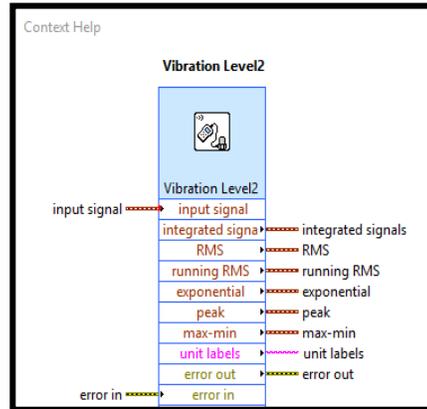
Figura 75. Pestaña velocidad



- La pestaña velocidad indica una tabla de la norma ISO 10816 para velocidades en máquinas industriales y muestra el menú de configuración dando las alertas según corresponda (figura 75).

Para esta configuración se utilizó el bloque Vibration Level

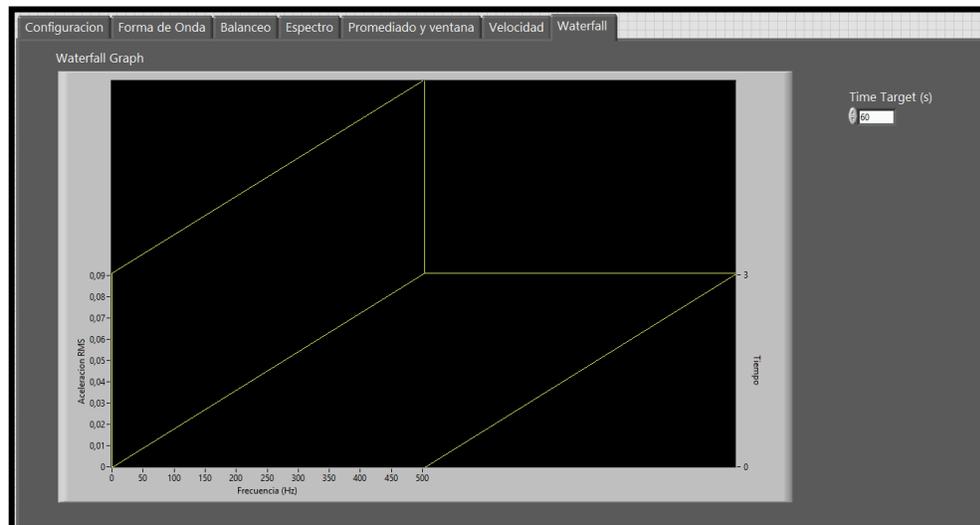
**Figura 76. Vibration level**



- **Vibration level.** Se usó con la finalidad de integrar la señal de la aceleración y convertirla en velocidad con el fin de poder determinar si la velocidad a la que opera es la correcta (figura 76).

## 7.7 Waterfall

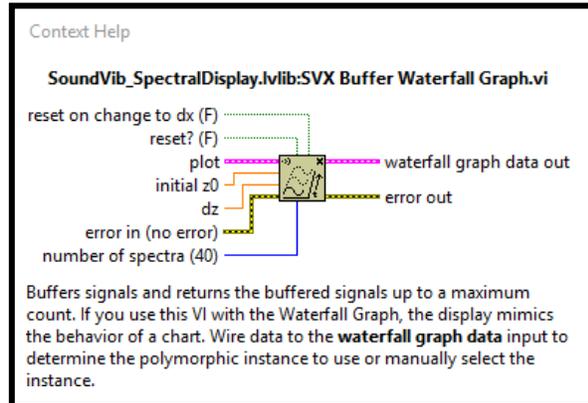
**Figura 77. Pestaña waterfall**



- La pestaña waterfall indica un gráfico en cascada de la forma espectral, la cual puede ser configurada para que se actualice en un tiempo determinado. Su finalidad es poder analizar el comportamiento de la

maquina representado en el espectro a través del tiempo y su variación (figura 77).

**Figura 78.** Buffer waterfall graph



- **Buffer waterfall graph.** Gráfica en cascada la forma espectral que es generada en la pestaña de espectro (figura 78).

## 8. CONSULTA BIBLIOGRÁFICA

Se realizó una consulta bibliográfica sobre diversos temas como vibraciones, sensores, análisis modal y sistema LabVIEW, adjuntado en el capítulo 3 del presente documento; los cuales sirvieron como fuente de conocimiento para el desarrollo del trabajo. Las principales fuentes bibliográficas consultadas fueron bases de datos y sitios Webs.

## 9. CONCLUSIONES

- Se adecuó e instrumentó banco de pruebas Rotor kit de la universidad por medio de sensores de vibraciones IEP y un tacómetro marca OROS, así mismo se implementó un nuevo motor junto a variador de velocidad lo cual permite un funcionamiento óptimo para el desarrollo de prácticas de laboratorio de la facultad de ingeniería mecánica
- Debido a que los sensores ADXL 335 no tenían un rango de operación lo suficientemente alto. Se optó por usar un acelerómetro (IEP convencional), que por sus características era más fiable y sus rangos operacionales eran mayores, adicional a esto brindaban una mayor facilidad en su instalación.
- Se identificaron las frecuencias naturales del eje por medios experimentales y por medio de elementos finitos, obteniendo un porcentaje de error del 13% debido a que las propiedades de material al momento de realizar el análisis se obtuvieron de tablas de la compañía general de aceros y no las que realmente tenía el material del eje.
- El programa desarrollado en LabView permite realizar un completo análisis de las vibraciones y visualizar cualquier tipo de anomalía o falla que pueda estar generando una máquina en su funcionamiento.
- Se realizó una consulta bibliográfica técnica sobre el área de vibración, la cual fue el punto de partida para el desarrollo del proyecto.

## 10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] OLARTE, William; BOTERO, Marcela; CAÑÓN, Benhur. Técnicas de mantenimiento predictivo utilizadas en la industria. *Scientia et technica*, 2010, vol. 2, no 45, p. 223-226
- [2] WHITE, Glen. Introducción al análisis de vibraciones. *Woburn, MA, Estados Unidos: Ázima*, 2010, vol. 551, p. 1990-2010.
- [3] «Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico» A-MAQ S.A, enero de 2005. Disponible en: <http://www.mantenimientoplanificado.com/.pdf> [Consultada el 20 de octubre de 2018]
- [4] INGARD, Uno; KRAUSHAAR, William L. Introducción al estudio de la mecánica, materia y ondas. Reverté, 1972.
- [5] «Análisis de vibraciones: Una tecnología clave del mantenimiento predictivo». Disponible en: <http://www.energiza.org/mantenimiento-de-plantas/19-mantenimiento-de-plantas/516-analisis-de-vibraciones-una-tecnologia-clave-del-man-tenimiento-predictivo>. [Consultada el 20 de octubre de 2018]
- [6] «Análisis modal» CATEC. Disponible en: <http://www.catec.aero/materiales-y-procesos/lisis-modal.htm>
- [7] «Ansys, 2018» [En línea]. Disponible en: <http://www.3dcadportal.com/ansys.html>.
- [8] «Modal analysis» [En línea]. Disponible en: [http://www.ansys.stuba.sk/html/guide\\_55/g-str/GSTR3.htm](http://www.ansys.stuba.sk/html/guide_55/g-str/GSTR3.htm)

[9] «Fundamentos del entorno LabVIEW» NATIONAL INSTRUMENTS [En línea].  
Disponible en: <http://www.ni.com/getting-started/labview-basics/esa/environment>

[10] «Variador de frecuencia, 2018» [En línea]. Disponible en:  
<https://new.abb.com/drives/es/que-es-un-variador>

[11] «Shaker, 2018» [En línea]. Disponible en: <http://www.modalshop.com/>

[12] «Norma ISO 10816» RODERPREX [En línea]. Disponible en:  
<http://www.rodamientos.com/assets/img/services/servbenf04.pdf>

## ANEXOS

### ANEXO A. Código programado del software

Se adjunta la imagen del código programado del software.

