

**ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE UN ANALISIS MODAL EXPERIMENTAL
(EMA) Y UN ANALISIS MODAL EN OPERACIÓN (OMA) REALIZADO SOBRE
UN ROTORKIT**

**FREDDY ALEXANDER GÓMEZ GONZÁLEZ
GUSTAVO ADOLFO HERRERA CASTAÑEDA**



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERIA Y ADMINISTRACIÓN
FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2011

**ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE UN ANALISIS MODAL EXPERIMENTAL
(EMA) Y UN ANALISIS MODAL EN OPERACIÓN (OMA) REALIZADO SOBRE
UN ROTORKIT**

**FREDDY ALEXANDER GÓMEZ GONZÁLEZ
GUSTAVO ADOLFO HERRERA CASTAÑEDA**

Trabajo de grado para optar el título de

INGENIERO MECÁNICO

Director

GILBERTO CARLOS FONTECHA DULCEY

Ingeniero Mecánico

MSc. Sonido y Vibraciones

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERIA Y ADMINISTRACIÓN
FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2011

NOTAS DE ACEPTACIÓN

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, 12 de junio 2011

DEDICATORIA

Doy infinitas gracias a mi Dios todo poderoso y a su hijo por estar siempre a mi lado, por sentir en mi corazón su compañía y apoyo, a mi virgencita María santísima por ser esa madre protectora que me guía por el buen camino y al espíritu santo por iluminarme en todo momento.

*A mis padres Hermelinda González y Ramiro Gómez a quienes debo mi vida y lo que soy, también a mis dos hermanos Edgar y Javier y a mi sobrina María de los Ángeles, ya que todos ellos me han apoyado, acompañado y guiado en todo momento, no me han dejado desfallecer y con quienes comparto el gozo de alcanzar el título de **INGENIERO MECÁNICO**.*

Por último agradezco a todos mis amigos y demás familiares y a Lucas con quienes he vivido momentos de alegría, tristeza pero sobre todo satisfacción.

Freddy Alexander Gómez González

DEDICATORIA

A Dios por darme la vida y a todas aquellas personas, a las cuales amo profundamente, mis padres Adolfo Herrera Gómez y Alba Lilian Castañeda Pacheco, quienes han sido los responsables y patrocinadores de mis pequeños y grandes triunfos.

A mis amigos y familiares, quienes han estado en todas las situaciones de gozo y adversidad, y aquellas personas que me han enseñado los valores y la importancia de nuestro que hacer en este mundo de contrastes.

Gustavo Adolfo Herrera Castañeda

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este proyecto expresan sus más sinceros agradecimientos a:

La Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Pontificia Bolivariana, por abrirnos sus puertas y permitirnos formar parte de esta gran familia bolivariana.

Al ingeniero Gilberto Carlos Fontecha nuestro director de proyecto por su apoyo y confianza.

A todos los profesores de ingeniería mecánica especialmente al ingeniero René Carreño.

Al profesor Olmedo González de la facultada de Ingeniería Industrial por su tiempo

A nuestros amigos y compañeros Elkin Arregoces y Yolima Mateus por su incondicional apoyo en el desarrollo de esta tesis.

Finalmente a todos nuestros compañeros de la facultad de Ing. Mecánica, por estos 6 años de aprendizaje para llegar a ser profesionales.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	3
OBJETIVO GENERAL	6
OBJETIVOS ESPECIFICOS:	6
1 MARCO TEORICO	7
1.1 ANÁLISIS MODAL	7
1.1.1 Definición de un análisis modal	7
1.1.2 Función de respuesta en frecuencia FRF	7
1.1.3 Forma modal	8
1.1.4 Frecuencia natural.....	8
1.1.5 El amortiguamiento	9
1.2 ANÁLISIS MODAL EXPERIMENTAL (EMA)	9
1.2.1 Tipos de excitación en análisis modal experimental.....	9
1.3 ANÁLISIS MODAL OPERACIONAL (OMA).....	10
1.3.1 ARTeMIS extracto pro.....	12
1.4 ESTADO ACTUAL DE LA TECNOLOGÍA	13
1.4.1 Software empleado para OMA	13
1.4.2 Publicaciones sobre OMA	17
1.5 PRUEBA DE HIPOTESIS	20
1.6 ROTORKIT	23
2 METODOLOGIA	24
2.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	24
2.2 RECONOCIMIENTO DE EQUIPOS Y HERRAMIENTAS.....	25
2.3 ANÁLISIS MODAL EXPERIMENTAL.....	30

2.3.1	Modelo FEM.....	30
2.3.2	Ensayo modal	32
2.4	ANÁLISIS MODAL OPERACIONAL	41
2.4.1	Adecuación del sistema	41
2.4.2	Registro de señales.....	43
2.4.3	ARTEMIS extractor pro.....	45
2.5	ESTADÍSTICOS.....	50
2.5.1	Estadísticos descriptivos	50
2.5.2	Prueba de hipótesis.....	50
3	ANÁLISIS Y RESULTADOS	53
3.1	RESULTADOS EMA	53
3.2	ANÁLISIS EMA	56
3.3	RESULTADOS OMA.....	58
3.4	ANÁLISIS OMA.....	61
3.5	ESTADÍSTICOS.....	62
3.5.1	Estadísticos descriptivos	62
3.5.2	Prueba de hipótesis.....	73
3.5.3	Estadísticos complementarios.....	75
4	CONCLUSIONES	79
5	RECOMENDACIONES.....	82
6	BIBLIOGRAFÍA.....	83

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. DIAGRAMA DE UN SISTEMA LINEAL Y FUNCIÓN DE RESPUESTA.	8
FIGURA 2. FORMAS MODALES DE DONGHAI BRIDGE - SHANGHAI/YANGSHAN, CHINA	8
FIGURA 3. ESQUEMA DEL ANÁLISIS MODAL OPERACIONAL.....	11
FIGURA 4. EJEMPLO DEL SOFTWARE ME'SCOPEVES	15
FIGURA 5. EJEMPLO DEL SOFTWARE BRÜEL&KJÆR.....	16
FIGURA 6. EJEMPLO DEL SOFTWARE LMS	16
FIGURA 7. PUBLICACIONES SOBRE “OPERATIONAL MODAL ANALYSIS - OMA”, EN“ISI WEB OF KNOWLEDGE”- POR PAÍS.	17
FIGURA 8. PUBLICACIONES SOBRE OPERATIONAL MODAL ANALYSIS - OMA”, EN“ISI WEB OF KNOWLEDGE”- 25 PRIMEROS AUTORES	18
FIGURA 9. PUBLICACIONES SOBRE OPERATIONAL MODAL ANALYSIS - OMA”, EN“ISI WEB OF KNOWLEDGE” POR AÑO.....	18
FIGURA 10. ROTORKIT BENTLY NEVADA RK4	23
FIGURA 11. ETAPAS DE LA METODOLOGÍA.....	24
FIGURA 12 EQUIPOS E INSTRUMENTOS PARA ENSAYO MODAL EN EMA	26
FIGURA 13. ADQUISICIÓN DE DATOS EN LABVIEW	27
FIGURA 14. PROGRAMA PARA EL SHAKER EN LABVIEW.....	28
FIGURA 15. ESPECTRO DE LA FRF DE PLACA CON CABLE AVERIADO.	29
FIGURA 16. ROTOR KIT	29
FIGURA 17. METODOLOGÍA PARA EMA	30
FIGURA 18. MODELO CAD DEL ROTORKIT.....	31
FIGURA 19. TERCER MODO VIBRATORIO DEL ROTORKIT	32
FIGURA 20. CUARTO MODO VIBRATORIO DEL ROTORKIT.....	32
FIGURA 21. SISTEMA DE REFERENCIA DEL ROTORKIT, VISTA DE PLANTA	33
FIGURA 22. SISTEMA DE REFERENCIA DEL ROTORKIT, VISTA FRONTAL.....	33
FIGURA 23. SISTEMA DE REFERENCIA DEL EJE SOBRE LIGAS.	34
FIGURA 24. SISTEMA DE REFERENCIA DEL EJE EN SHAKER.	34

FIGURA 25. VISTA LATERAL DEL MONTAJE DEL ROTORKIT PARA ENSAYO MODAL EMPLEADO EL SHAKER.....	35
FIGURA 26. ESQUEMA GENERAL PARA UN ENSAYO MODAL	36
FIGURA 27. ENSAYO MODAL DE IMPACTO EN EL ROTORKIT.....	37
FIGURA 28. FRF DEL PUNTO A3 ROTOR KIT	38
FIGURA 29. FRF OBTENIDA A PARTIR DE UN ENSAYO MODAL DE IMPACTO EN EL ROTORKIT.	38
FIGURA 30. FASE ENTRE LA DIRECCIÓN DEL DESPLAZAMIENTO Y LA DIRECCIÓN DEL GOLPE, PARA EL PRIMER MODO VIBRATORIO. (A) DIRECCIÓN DE DESPLAZAMIENTO. (B) ÁNGULO DE FASE ENTRE LA DIRECCIÓN DE DESPLAZAMIENTO Y DIRECCIÓN FUERZA.	39
FIGURA 31. METODOLOGÍA PARA OMA CON ARTEMIS.....	41
FIGURA 32. MONTAJE PARA OMA EN ROTORKIT.....	42
FIGURA 33. PROGRAMA DE NI SOUND AND VIBRATION ASSISTANT PARA GRABACIÓN DE SEÑALES.....	43
FIGURA 34. ESQUEMA GENERAL PARA REGISTRO DE SEÑALES EN OMA.....	43
FIGURA 35. EQUIPOS UTILIZADOS PARA CONTROL DE VELOCIDAD EN OMA ROTORKIT....	44
FIGURA 36. SISTEMA DE REFERENCIA ARTEMIS PARA MEDICIONES DE RESPUESTA EN ROTORKIT	45
FIGURA 37. ARCHIVO *.SVS	47
FIGURA 38. SETUP DEL ARCHIVO DE MEDICIÓN EN *.SVS.....	47
FIGURA 39. CREACIÓN DE PROYECTO EN ARTEMIS.	48
FIGURA 40. ANÁLISIS MODAL PRELIMINAR ARTEMIS.	48
FIGURA 41. TASK BAR	48
FIGURA 42. CONTROL DE PROCESAMIENTO DE SEÑAL.	48
FIGURA 43. SEÑAL DE RESPUESTA PROCESADA POR LOS MÉTODOS EFDD Y SSI-UPC.	49
FIGURA 44. METODOLOGÍA DE LA PRUEBA DE HIPÓTESIS	50
FIGURA 45. NIVEL DE SIGNIFICANCIA	51
FIGURA 46. DECISIÓN DE LA PRUEBA DE HIPÓTESIS	52
FIGURA 47. CAJA Y BIGOTES PARA EMA- EJE EXCITACIÓN POR IMPACTOS.....	67
FIGURA 48. CAJA Y BIGOTES PARA EMA- EJE EXCITACIÓN POR BARRIDO SINUSOIDAL....	67

FIGURA 49. CAJA Y BIGOTES PARA EMA- EJE EXCITACIÓN ALEATORIA	68
FIGURA 50. CAJA Y BIGOTES PARA EMA- PLACA EXCITACIÓN POR IMPACTOS	68
FIGURA 51. CAJA Y BIGOTES PARA EMA- PLACA EXCITACIÓN POR BARRIDO SINUSOIDAL	69
FIGURA 52. CAJA Y BIGOTES PARA EMA- PLACA EXCITACIÓN ALEATORIA.....	69
FIGURA 53. CAJA Y BIGOTES PARA EMA- PLACA CON MOTOR EXCITACIÓN POR IMPACTOS	70
FIGURA 54. CAJA Y BIGOTES PARA EMA- ROTORKIT EXCITACIÓN POR IMPACTOS.....	71
FIGURA 55. CAJA Y BIGOTES PARA EMA- ROTORKIT EXCITACIÓN ALEATORIA	71
FIGURA 56. CAJA Y BIGOTES PARA EMA- ROTORKIT EXCITACIÓN POR BARRIDO SINUSOIDAL	72
FIGURA 57. DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DEL VALOR DELTA	78

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA MODAL DE IMPACTO EN EL ROTORKIT	40
TABLA 2. EJEMPLO DE LOS RESULTADOS DE EMA.....	40
TABLA 3. EJEMPLO PRUEBA DE HIPÓTESIS ENTRE EMA Y OMA	52
TABLA 4. RESULTADOS DE ANÁLISIS MODAL EXPERIMENTAL EN PLACA CON MOTOR	53
TABLA 5. RESULTADOS DE ANÁLISIS MODAL EXPERIMENTAL EN ROTORKIT.....	54
TABLA 6. RESULTADOS DE ANÁLISIS MODAL EXPERIMENTAL EN PLACA.....	54
TABLA 7. RESULTADOS DE ANÁLISIS MODAL EXPERIMENTAL EN EJE PARA EL MONTAJE 1.	55
TABLA 8. RESULTADOS DE ANÁLISIS MODAL EXPERIMENTAL EN EJE PARA MONTAJE 2	55
TABLA 9. RESULTADO ANÁLISIS MODAL OPERACIONAL EN PLACA CON MOTOR	58
TABLA 10. RESULTADOS DE ANÁLISIS MODAL OPERACIONAL EN UN ROTORKIT.	59
TABLA 11. RESULTADOS DE ANÁLISIS MODAL OPERACIONAL EN UNA PLACA.	59
TABLA 12. RESULTADOS DE ANÁLISIS MODAL OPERACIONAL EN EJE PARA EL MONTAJE 1.	60
TABLA 13. RESULTADOS DE UN ANÁLISIS MODAL OPERACIONAL EN UN EJE PARA EL MONTAJE 2.	60
TABLA 14. PRUEBA DE HIPÓTESIS ENTRE EMA Y OMA.....	73
TABLA 15. VALOR DELTA (Hz) EN LAS DISTINTAS CONFIGURACIONES PARA EMA Y OMA	76

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A: VI'S LABVIEW

ANEXO B: RESULTADOS ANSYS

ANEXO C: MONTAJES PARA EMA

ANEXO D: ESPECTROS DE EMA

ANEXO E: BASE DE DATOS EMA-EXCEL

ANEXO F: MONTAJES PARA OMA

ANEXO G: RESULTADOS ARTeMIS EXTRACTOR PRO

ANEXO H: ESTADISTICOS DESCRIPTIVOS

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

- TITULO:** Análisis comparativo entre un análisis modal experimental y un análisis modal en operación realizado sobre un Rotorkit.
- AUTORES:** Freddy Alexander Gómez González
Gustavo Adolfo Herrera Castañeda
- FACULTAD:** Facultad de Ingeniería Mecánica
- DIRECTOR:** Gilberto Carlos Fontecha Dulcey

RESUMEN

En el presente trabajo de grado, se llevó a cabo una comparación estadística entre los datos recopilados de un análisis modal experimental (EMA) y un análisis modal operacional (OMA), por medio de una prueba de hipótesis, con el fin de informar si existen o no diferencias significativas entre los resultados obtenidos con el software ARTeMIS Extractor Pro y con LABVIEW 2009.

Para lograr el objetivo general de esta tesis, se desarrolló una serie de ensayos modales experimentales y operacionales en un eje, placa y Rotorkit, bajo diferentes tipos de excitación, con el fin de determinar las frecuencias naturales, datos requeridos para realizar la prueba de hipótesis correspondiente, por medio de la cual fue posible informar, que para la mayoría de los casos evaluados se presentan diferencias significativas entre ambos métodos.

PALABRAS CLAVES:

Ensayo modal, análisis modal operacional, análisis modal experimental, prueba de hipótesis, Rotorkit.

GENERAL ABSTRACT OF DIPLOMA WORK

TITLE: Comparison analysis between an experimental modal analysis and operational modal analysis performed on a Rotorkit.

AUTHORS: Freddy Alexander Gómez González
Gustavo Adolfo Herrera Castañeda

FACULTY: Faculty of Mechanical Engineering

DIRECTOR: Gilberto Carlos Fontecha Dulcey

ABSTRACT

This diploma work is about a statistical comparison between the data collected from an experimental modal analysis (EMA) and Operational modal analysis (OMA). The approach was through a test of hypotheses, the aim is to report if there are significant differences between the results obtained from the software ARTEMIS Extractor PRO (OMA) and the results obtained with LABVIEW 2009 (EMA)

To achieve the general objective of this work, a series of experimental and operational modal testing on a shaft, plate and Rotor kit was developed, under different types of excitation; thus determining the natural frequencies. In most of the cases evaluated there were found significant differences between both methods

KEYWORDS

Modal testing, operational modal analysis, experimental modal analysis, test of hypotheses, Rotorkit.

INTRODUCCIÓN

El análisis dinámico estructural representa un aspecto de vital importancia para el diseño de estructuras y elementos de máquinas, los cuales bajo cargas dinámicas y estáticas deben alcanzar un alto desempeño y una alta resistencia.[1] [2]

A inicios del siglo XX, no siempre se tenía especial cuidado en este tipo de estudios, al no considerarlo pertinente en determinados sistemas; sin embargo, esto conllevaba a un alto riesgo de falla, como por ejemplo sucedió, con el colapso del puente **Tacoma Narrows**, el 7 de noviembre en 1940 en estados Unidos, uno de los casos más citados por la comunidad científica mundial, al presentarse un fenómeno vibratorio denominado resonancia, a causa del flameo aerodinámico, por efecto de la velocidad del viento la cual logró superar a la velocidad crítica del flameo torsional, causando que el puente finalmente colapsará después de oscilar por una hora aproximadamente 900 veces de modo torsional. [3]

Los diseñadores de dicho puente se percataron una vez terminada la obra, que este se deformaba y se ondulaba longitudinalmente de forma peligrosa, aún en condiciones de viento relativamente normales en la zona; además, no habían concebido en la etapa de diseño, dicho modo torsional, que sin duda fue uno de los responsables que se presentara falla por fatiga en la mitad de la luz de la estructura. Por casos similares al anteriormente mencionado hacen que el estudio de los fenómenos de vibración, alrededor del análisis de los modos vibratorios (análisis modal), como lo exponen D.J. Ewins [2], Jimmin He y Zhi-Fang-Fu [1], se hayan venido convirtiendo en una de las principales tecnologías en los campos de las ingenierías civil, mecánica, aeronáutica y acústica, en determinar y mejorar las características dinámicas de estructuras ingenieriles.

El análisis y los ensayos modales han ganado especial atención en la últimas dos décadas a nivel global, gracias al avance de la electrónica y la informática, facilitando la ejecución de este tipo de análisis; aspecto por el cual, la escuela de ingeniería mecánica de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga, en coordinación con el laboratorio de sonido y vibraciones, concentra esfuerzos para desarrollar trabajos experimentales, dentro de actividades académicas, alrededor de este tema; y de igual forma ha hecho su extensión investigativa con la prestación de servicios industriales y capacitaciones junto con el grupo de investigación **GiDeTechMa**, el cual ha sido organizado y liderado en al área relacionada con Sonido y vibraciones mecánicas por el **Ing. Gilberto Fontecha Dulcey, MSc.** y sus colaboradores.

Algunos de los trabajos aplicados que se han planeado y desarrollado en el laboratorio se fundamentaron en este tema específico haciendo análisis sobre elementos tales como: cigüeñales, ejes de levas, platinas y estructuras civiles (torre de perforación a escala); por otra parte, se han realizado otros trabajos de grado sobre ensayos a fatiga con un método basado en resonancia.

El Objetivo de esta tesis es comparar con ayuda de una herramienta estadística las frecuencias naturales, extraídas de resultados obtenidos en un análisis modal experimental y los obtenidos de manera operacional con ARTeMIS Extracto Pro en un Rotorkit, en su placa y en su eje. Para tal propósito se planteó una metodología enmarcada inicialmente en realizar una revisión bibliográfica de los temas involucrados para el desarrollo de esta tesis, posteriormente, llevar a cabo los ensayos modales respectivos sobre los sistemas anteriormente mencionados, realizar las pruebas de hipótesis con base a los datos recopilados con el software Labview y ARTeMIS y finalmente, realizar un informe en el que se exponga el trabajo realizado durante la tesis.

Este informe está conformado por cinco capítulos, el primero corresponde al marco teórico, donde se sintetiza la conceptualización requerida para entender el trabajo que en este documento se expone, al igual que el estado actual de la tecnología, alrededor del tema del análisis modal operacional y ensayo modal. En el segundo capítulo, se enseña la metodología planteada y desarrollada, para alcanzar los objetivos propuestos en el proyecto. Esta metodología está conformada básicamente por 5 etapas, las cuales fueron llevadas a cabo de forma secuencial en el transcurso de la tesis.

En el tercer capítulo están los resultados y análisis de las pruebas, experimentales y en operaciones, obtenidas con el software LabVIEW 2009 y ARTeMIS, respectivamente, que fueron realizadas sobre el eje, placa, placa con motor y Rotorkit en las distintas configuraciones, además de los resultados estadísticos y la prueba de hipótesis efectuada.

Los capítulos quinto y sexto, presentan las conclusiones y las recomendaciones que son la síntesis de los análisis previamente realizados los cuales son importantes puesto que permiten visualizar el aporte investigativo y el desarrollo de la metodología aplicada. Este informe se finaliza con la citación bibliográfica y la presentación de los anexos, donde se encuentran detalles acerca del trabajo realizado.

Este trabajo de carácter investigativo, llevado a cabo para los casos específicos del rotor kit, placa y eje, resulta una base sobre la cual se puede llegar a desarrollar estudios enfocados en aspectos particulares del análisis modal para el laboratorio de sonido y vibraciones de la universidad pontificia bolivariana seccional Bucaramanga; y con ello evaluar las posibilidades en proseguir con aplicarlos a sistemas de interés para la ingeniería mecánica y áreas de conocimiento a fines.

OBJETIVO GENERAL

Realizar tres análisis modales en un Rotor kit, mediante análisis modal experimental y análisis modal en operación ARTeMIS, para obtener un indicador comparativo de los resultados entre los dos métodos.

OBJETIVOS ESPECIFICOS:

- Consultar y sintetizar la bibliografía requerida acerca de análisis modal experimental (EMA) y análisis modal en operación (OMA). **Resultado:** marco teórico **Indicador:** debe citar mínimo 6 papers científicos, 4 libros y 3 Casos de estudio.
- Realizar un análisis modal experimental (EMA) mediante excitación y respuesta dinámica al Rotor kit. **Resultado:** análisis modal. **Indicador:** Las pruebas se deben hacer experimentalmente en un Rotorkit, en su placa y en su eje, con diferentes tipos de excitación y con su respectivo modelo analítico, FEM (finite element method).
- Realizar análisis modal en operación (OMA) mediante el software ARTeMIS. **Resultado:** análisis modal. **Indicador:** Hacer el análisis modal de acuerdo a las instrucciones del fabricante del software y haciendo pruebas con diferentes tipos de excitación.
- Evaluar los resultados mediante análisis comparativo entre los dos métodos. **Resultado:** informe con la evaluación comparativa. **Indicador:** una comparación de resultados de acuerdo al método estadístico de prueba de hipótesis.

1 MARCO TEORICO

1.1 ANÁLISIS MODAL

1.1.1 Definición de un análisis modal.

El análisis modal es el proceso, por medio del cual se determinan las características dinámicas inherentes de un sistema, tales como: *las frecuencias naturales, las formas modales y el(los) factor(es) de amortiguamiento*, información que es empleada para formular un modelo analítico que simule el comportamiento dinámico de determinados sistemas mecánicos y estructurales.[1]

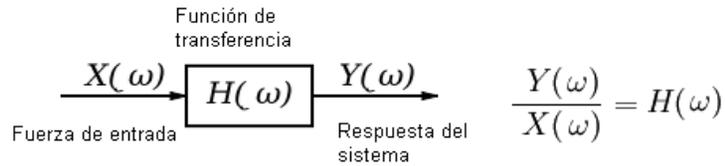
El análisis modal se basa en el hecho que la respuesta vibratoria de un sistema mecánico lineal invariante en el tiempo, pueda ser expresado como la combinación lineal de un conjunto de movimientos armónicos simples (que pueden ser representados por un sistema masa – resorte) los cuales se denominan modos vibratorios. [1]

Estos modos vibratorios son características inherentes al sistema dinámico, que son determinados por propiedades físico-mecánicas tales como: *rigidez, masa, amortiguamiento y geometría*. [1]

1.1.2 Función de respuesta en frecuencia FRF

Relación lineal o función de transferencia entre la respuesta de un sistema y la excitación que intervienen sobre ella. La FRF está en función de las propiedades físico-mecánicas y dinámicas del material que lo conforma, y las cuales deben permanecer invariantes con respecto al tiempo, para que la determinación de esta función tenga éxito. La respuesta puede darse en términos de desplazamiento, velocidad o aceleración (ver Figura 1). [1] [4]

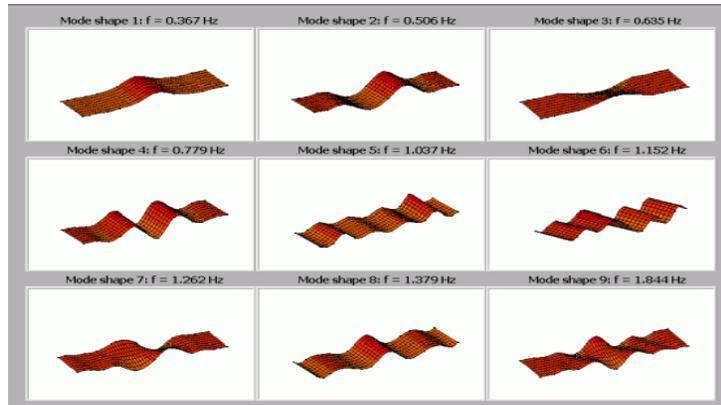
Figura 1. Diagrama de un sistema lineal y función de respuesta.



1.1.3 Forma modal

La forma modal es un patrón de vibración, el cual se define como las posibles formas geométricas que adopta un sistema mecánico al estar sometido a vibraciones a una determinada frecuencia. (Ver Figura 2).[5] [6]

Figura 2. Formas modales de Donghai Bridge - Shanghai/Yangshan, China



Tomada de: página web de NATIONAL INSTRUMENTS
<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/6624> [consultada 5 Diciembre de 2010]

1.1.4 Frecuencia natural

La Frecuencia natural es la frecuencia a la que un sistema mecánico seguirá vibrando, después que se quita la señal de excitación. [5clases]

Una estructura o sistema mecánico con múltiples grados de libertad (MDOF) tendrá múltiples frecuencias naturales, las cuales corresponden a las frecuencias presentes en las distintas formas modales o modos. [7 Harris]

1.1.5 El amortiguamiento

El amortiguamiento es el fenómeno por medio del cual la energía mecánica es disipada (usualmente por la conversión en energía interna) en sistemas dinámicos.

El conocimiento de los niveles de amortiguamiento en un sistema dinámico es importante en la utilización en los ensayos de los sistemas mecánicos. Una de los mecanismos de amortiguación es el visco-elástico, el cual corresponde a la disipación energía producto de la transferencia de calor por efecto de fricción molecular. [5][8]

1.2 ANÁLISIS MODAL EXPERIMENTAL (EMA)

Este análisis es utilizado en la ingeniería mecánica para caracterizar dinámicamente estructuras relativamente pequeñas. La primera fase corresponde al ensayo modal (modal testing), donde en un ambiente controlado se excita los sistemas (forced vibration test FVT), con el fin de obtener de manera precisa por medio de la función de transferencia, los parámetros modales. [1][9]

La instrumentación empleada para llevar a cabo este tipo de análisis son: el martillo de impacto, acelerómetros, Shaker, DAQ's, un analizador de espectros (Software de análisis y control), generador de señal y amplificador de señal. [7]

1.2.1 Tipos de excitación en análisis modal experimental.

- **Excitación por impacto:**

El dominio del tiempo de la señal fuerza para la excitación por impacto es un pulso con frecuencias incontrolables. En términos de instrumentación, este método es simple comparado con respecto a otro que emplea excitación con shaker. Es conveniente para usarlo en casos donde se requiera trabajo en campo. [1]

- **Excitación sinusoidal:**

Se puede considerar el método más tradicional para el análisis modal clásico.

La excitación la compone una sola frecuencia a la vez y los barridos de excitación de una frecuencia a otra van a un paso determinado, permitiendo a la estructura abordar una vibración armónica a la vez. Esta excitación es eficaz para estructuras con un nivel de vibración alta, para caracterizar la no linealidad de una estructura, y para excitar los modos de vibración de una estructura amortiguada.

[1]

- **Excitación aleatoria**

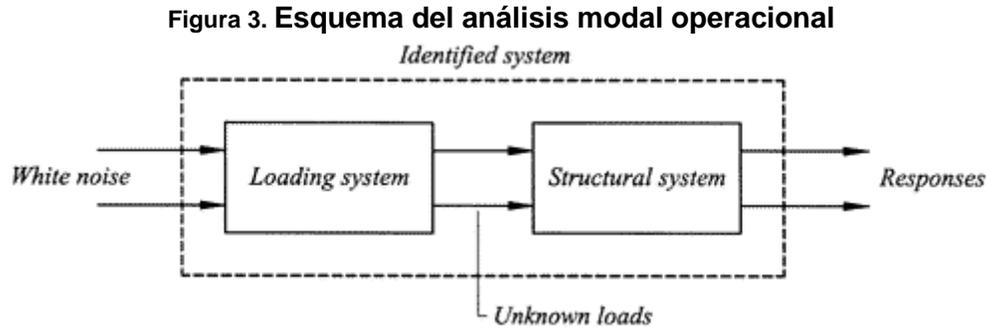
La señal de fuerza para este tipo de excitación es una señal aleatoria estacionaria con distribución Gausiana. También tiene todas las frecuencias en el rango de excitación. La excitación aleatoria sirve para una estructura que se comporta de forma no lineal, ya que tiende a linealizar el comportamiento de los datos de medición. [1]

1.3 ANÁLISIS MODAL OPERACIONAL (OMA)

Desde hace más de 60 años se vienen dando esfuerzos por desarrollar estudios sobre los fenómenos vibratorios enfocados a métodos experimentales. En primera instancia, se medían solo las respuestas durante la operación, con el propósito de emitir un diagnóstico del comportamiento dinámico de una estructura o máquina, sin embargo, se presentaron algunas limitantes en este método, de ahí se avanzó al análisis modal experimental. No obstante, no en todos los casos, se pueden efectuar este tipo de análisis ya que en algunos casos, como en grande estructuras, existen limitaciones desde el punto de vista técnico y económico, en la manera de excitar controladamente el sistema entre otras. Por situaciones como las anteriores, el análisis modal operacional (OMA), también conocido como '*Output Only Modal Analysis*' o '*Ambient Modal Analysis*', tiene gran importancia al permitirle a los ingenieros y técnicos especialistas en el tema, obtener los

parámetros modales, que son igualmente alcanzados de forma experimental, con solo medir las respuestas sobre los sistemas en su entorno operacional. [10][11][12]

En la Figura 3, se ilustra la idea del análisis modal operacional:



Tomada de: Help de ARTeMIS Extractor Pro.

De las principales ventajas presentes en el OMA [12]:

- La prueba es rápida y no es costosa, ya que para la excitación el equipo no es necesario.
- La respuesta que es medida, representa las condiciones reales de funcionamiento de la estructura.
- Las pruebas no afectan el funcionamiento de la estructura a analizar.

No obstante al aplicar este método ocurren dos particularidades que son desfavorables, por una parte la respuesta en la estructura es pequeña y algunas veces solo ruido, por ello el método OMA se hace más tedioso que el EMA.

1.3.1 ARTeMIS extracto pro

Es el software desarrollado por la empresa Danesa “structural vibrations solution” SVS, que emplea una serie de algoritmos basados en procesos estocásticos*, para la identificación modal (frecuencias naturales, formas modales, factor de amortiguamiento), solo a partir de las respuestas obtenidas en un sistema dinámico bajo condiciones reales de operación. Este software se caracteriza principalmente por [12][13] [14]:

- Realizar una rápida identificación en el dominio de respuesta en frecuencia de las formas modales, frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.
- Tener algoritmos basados en el dominio en frecuencia para la identificación imparcial de los modos vibratorios, frecuencias naturales y factores de amortiguamientos.
- Manejar múltiples configuraciones de los ensayos y múltiples puntos de referencia.
- Tener tres algoritmos de descomposición del dominio en frecuencia, construyendo inmediatamente la animación de la forma modal.
- Tener tres algoritmos de identificación del sub-espacio estocástico en el dominio del tiempo Crystal Clear (SSI), Principal componente (PC), Unweighted Principal Component (UPC) y Canonical Variate Analysis (CVA).
- Proporcionar algoritmos para la identificación de los armónicos, por medio de la función de curtosis, la cual debe activarse antes de realizarse el análisis modal.

* **Estocástico:** “Teoría estadística de los procesos cuya evolución en el tiempo es aleatoria, tal como la secuencia de las tiradas de un dado”. *Tomado de: Diccionario de la Real Academia Española.* http://buscon.rae.es/draeI/SrvltConsulta?TIPO_BUS=3&LEMA=estocastico[Consulta 15 junio 2011]

- Facilitar diagramas de estabilización en los que se distinguen entre los modos físicos y los computacionales, realizando una clasificación entre los mismos.

1.4 ESTADO ACTUAL DE LA TECNOLOGÍA

En los últimos años el análisis modal operacional (OMA) se ha venido utilizando como una técnica para determinar los parámetros modales en estructuras civiles, en la que la excitación se da por medio de cargas naturales, las cuales no se pueden controlar fácilmente, como por ejemplo las cargas inducidas por el viento (en edificios) o cargas por tráfico (en puentes). Un ejemplo para este caso es el que realizo sobre el “*Infante D. Henrique Bridge*” con el empleo del software ARTeMIS [24] expuesto por **SVS**.

Así mismo el análisis operacional se está empleando en las estructuras mecánicas, donde la excitación es dada por el funcionamiento de elementos rotativos generalmente, como por ejemplo, el ruido proporcionado por los rodamientos o motores. [12][13] Lo anterior se puede observar en los casos de estudio expuestos por **Brüel&Kjær** “*operational modal analysis on wind turbine*” [25] y “*Frequency Domain Techniques for Operacional Modal Analysys*” [26], en los cuales se examinan el comportamiento dinámico de la caja de transmisión de una turbina eólica y el comportamiento de un aspa a escala de la misma turbina eólica.

1.4.1 Software empleado para OMA

En lo referente al procesamiento en EMA se encuentran diferente software que permiten desarrollar un análisis con base en las señales de entrada y salida; sin embargo, en ciertos casos no es posible medir la señal de entrada, por lo cual existe la necesidad de encontrar en el mercado software para desarrollar análisis modales operacionales (OMA)

Entre algunos de los software que se encuentran para desarrollar dicho análisis en operación están:

1.4.1.1 ME'scopeVES

Desarrollado por la empresa “Vibrant technology” de Estados Unidos, es un software para técnicos o ingenieros que trabajan en la solución de problemas de vibraciones y acústica, investigación de nuevos productos, mantenimiento predictivo, control de calidad de fabricación y control de máquinas estructuras críticas. ME'scopeVES puede adquirir y post procesar señales con dominio en el tiempo y frecuencia en múltiples canales. Es líder en la industria de animación 3D interactiva que permite observar las formas de deflexión en operación (ODS), que se dan en las maquinas, frecuencias naturales o resonancias, formas modales. Dentro de los paquetes que incluye este software se encuentra como opción el OMA (VT-910 Visual OMA). (Ver Figura 4)

1.4.1.2 Brüel&Kjær

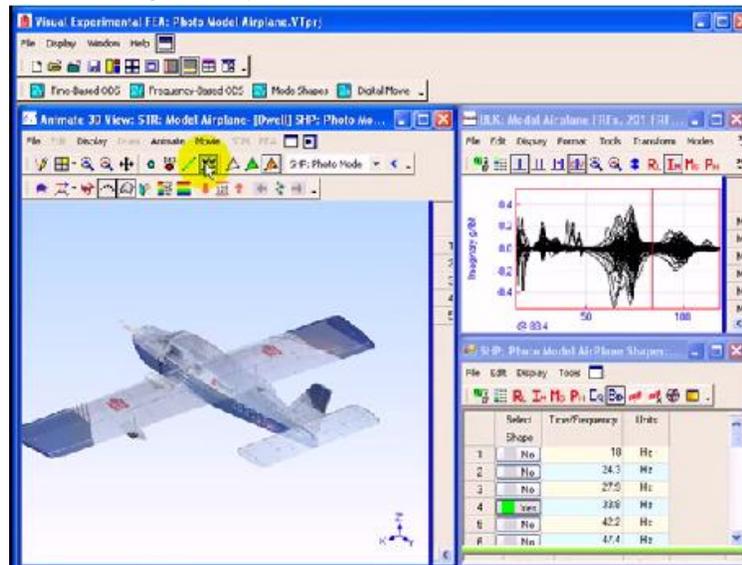
Es una empresa de Bélgica, la cual suministra soluciones de mediciones y análisis en el área del sonido y las vibraciones; los cuales poseen dentro de sus herramientas para análisis de vibraciones el software “Operational Modal Analysis Type 7760”, basado en la misma tecnología que se tiene en ARTeMIS. Esto incluye el uso de los poderosos algoritmos *Frequency Domain Decomposition (FDD)*, *Enhanced Frequency Domain Decomposition (EFDD)* y *Curve-fit Frequency Domain Decomposition (CFDD)*. (Ver Figura 5)

1.4.1.3 LMS TestLabOperational Modal Analysis

Desarrollado por la empresa Belga LMS, el modulo *Test.LabOperational Modal Analysis* (Ver Figura 6) extrae los parámetros modales de las respuestas de las mediciones en el tiempo y además proporciona un conjunto de herramientas para la validación de un modelo modal, síntesis de datos y visualización de forma modal.

Al realizar el análisis modal de las estructuras en funcionamiento con los componentes de rotación, tales como en helicópteros u otras máquinas rotativas, los componentes armónicos podrían influir en los resultados de la prueba. Con el complemento de eliminación de armónicos de LMS Test.Lab, el contenido de armónicos en los datos en el tiempo puede ser filtrado.

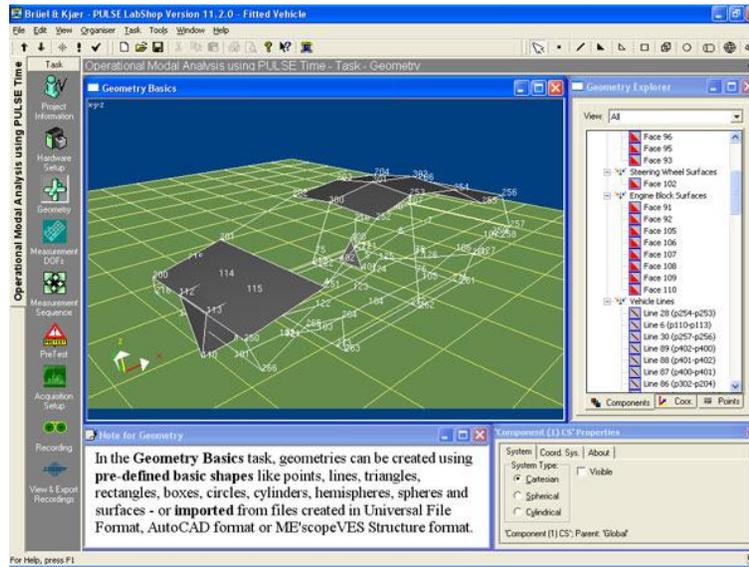
Figura 4. Ejemplo del software ME'scopeVES



Tomada de <http://www.vibetech.com/go.cfm/en-us/content/index/x?>

[Consultada el 11 junio 2011]

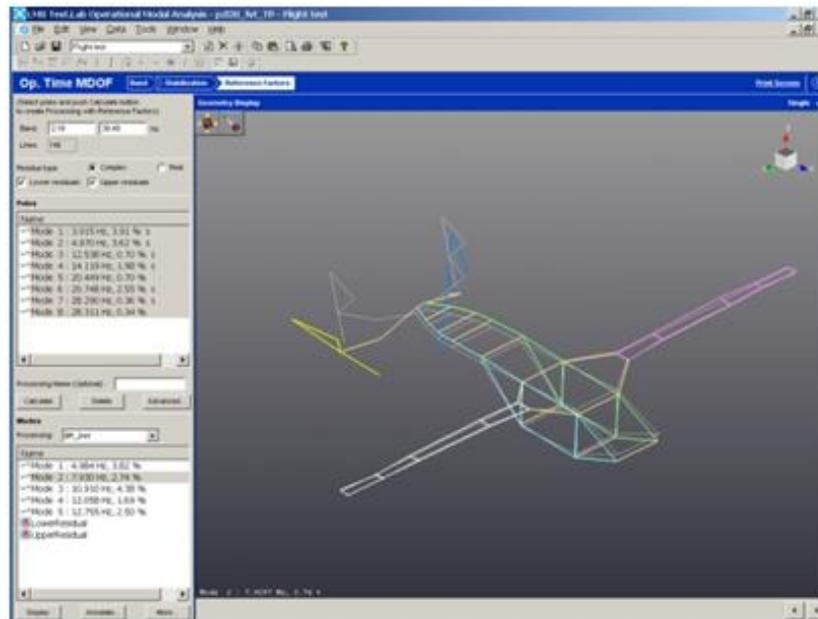
Figura 5. Ejemplo del software Brüel&Kjær



Tomada

de: www.bksv.es/Products/PULSEAnalyzerPlatform/PULSESolutionsOverview/StructuralDynamics/OperationalModalAnalysis.aspx [consulta 11 junio 2011]

Figura 6. Ejemplo del software LMS



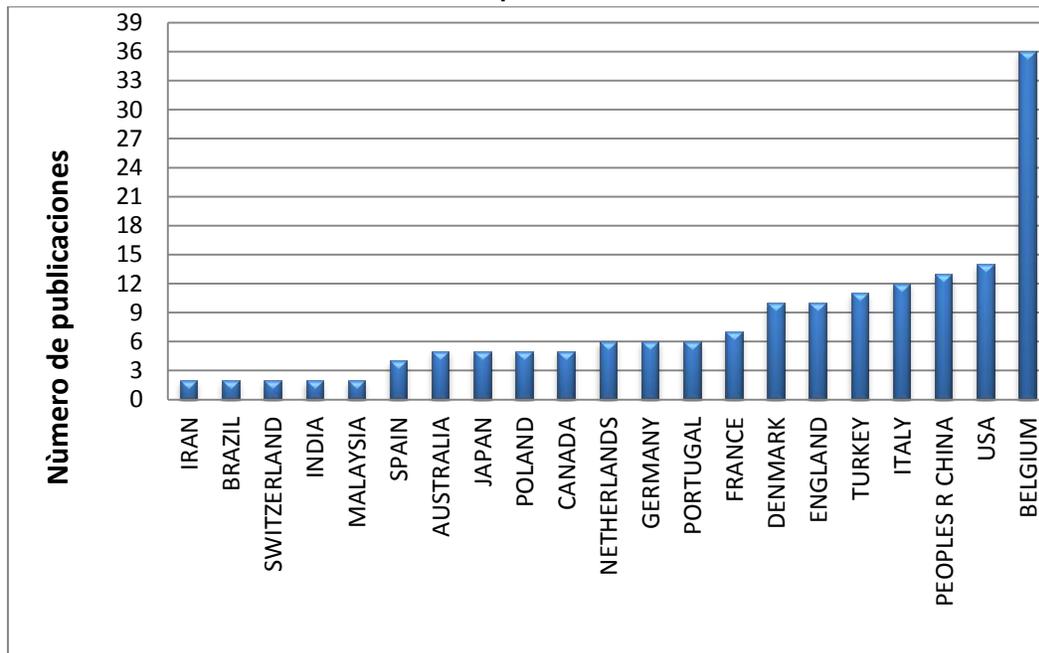
Tomada de:

<http://www.lmsintl.com/testing/structures/operational-modal-analysis>.
[Consulta 11 Junio de 2011]

1.4.2 Publicaciones sobre OMA

Se consultó en la base de datos “*ISI web knowledge*” (<http://apps.isiknowledge.com>) las publicaciones realizadas sobre el tema “Operational Modal Analysis – OMA”, y a partir de los resultados se construyeron las siguientes gráficas:

Figura7. Publicaciones sobre “Operational Modal Analysis - OMA”, en “*ISI web of knowledge*”- por país.

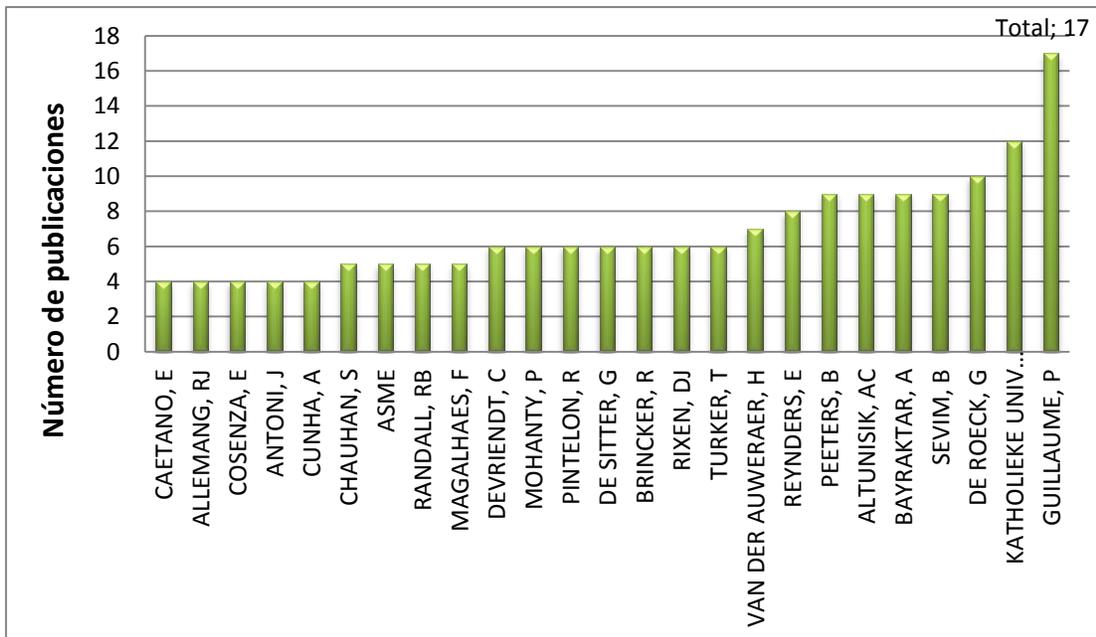


Información consultada en la plataforma “*ISI web knowledge*” el día 2 julio de 2011

A partir de la información de la Figura7, en la que se exponen los países en donde el tema operacional es objeto de estudio, se puede observar que a la fecha de hoy, Europa ha presentado el 63% de las publicaciones, siendo Bélgica el país líder no solo en este continente sino en el mundo, con un 22% (36 publicaciones).

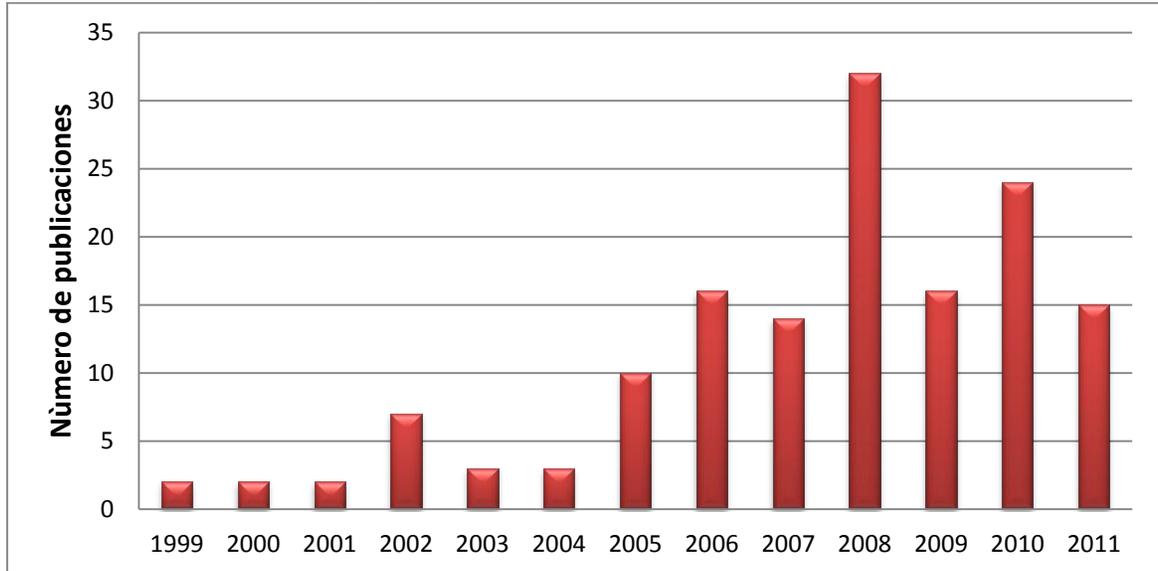
Estados Unidos y china tienen el segundo y tercer puesto en publicaciones y en el caso de Latinoamérica el único país presente es Brasil con 2 publicaciones.

Figura 8. Publicaciones sobre Operational Modal Analysis - OMA”, en“ISI web of knowledge”- 25 primeros autores



Información consultada en la plataforma “*Isi web knowledge*” el día 2 julio de 2011

Figura 9. Publicaciones sobre Operational Modal Analysis - OMA”, en“ISI web of knowledge” por año



Información consultada en la plataforma “*Isi web knowledge*” el día 2 julio de 2011

En lo que se refiere a autores son de destacar a GUILLAUME, P (17 publicaciones) o DE ROECK, G (10 publicaciones), (ver Figura7), de igual modo se resalta a la “Katholieke Universiteit Leuven”, ya que según **ISI web knowledge**, en esta universidad de Suecia tiene 12 publicaciones ocupando el segundo lugar, cabe aclarar que los autores GUILLAUME y DE ROECK, hacen parte del grupo de investigadores de esta universidad.

Finalmente con relación a la Figura 9 se observa que el tema de análisis modal operacional ha tenido un crecimiento exponencial en la última década, siendo el año 2008 el de mayores publicaciones. Es de anotar que en los últimos 6 meses del presente año 2011, se han presentaron 15 publicaciones.

1.5 PRUEBA DE HIPOTESIS

Cuando en un estudio o investigación se desea tomar una decisión acerca de ciertas características de una determinada muestra o población, existe una herramienta estadística denominada **prueba de hipótesis**, la cual permite de forma metódica, a quien está realizando el trabajo investigativo, tomar una decisión acerca de una **hipótesis estadística**. [19] [20]

Las siguientes definiciones fueron tomadas de “Lección 14: Prueba de Hipótesis” del libro Manual de estadística [19]:

Hipótesis nula (H_0): Hipótesis estadística que se formula con el propósito de ser nulificada o rechazada; esta hipótesis es la que se desea poner a prueba.

Hipótesis alternativa (H_1): Hipótesis estadística que difiere de la hipótesis nula; esta es la complementaria de dicha hipótesis, siendo tomada en cuenta cuando se rechace la hipótesis nula.

Errores Tipo I: Error que se comete al rechazar la hipótesis nula, cuando se debió aceptar.

Errores Tipo II: Error que se comete al aceptar la hipótesis nula, cuando se debió haber rechazado.

Nivel de Significancia (α): Es la máxima probabilidad, con la cual se estaría dispuesto a arriesgar cometer un error tipo I.

Estadística de prueba: Es la variable aleatoria cuyo valor se calcula a partir de los datos muestrales recolectados, con el objeto de tener información, para tomar una decisión (rechazar o aceptar) acerca de la hipótesis nula enunciada, en base a la regla de decisión planteada para el caso estudiado.

Regla de decisión: Es un enunciado condicional, bajo el cual se basa un investigador para decidir si se debe rechazar o no una hipótesis nula. Esta generalmente se plantea en el inicio del proceso, antes de recolectar datos y especificar cómo se llegara a ella.

Conclusión: Descripción que se realiza al final de la prueba de hipótesis con el objeto de describir cuidadosamente el significado de la decisión relativa al propósito de dicha prueba.

Intervalo de confianza: se define como la región bajo la cual una determinada variable estará definida, en base a una probabilidad dada.

Región crítica: Es aquel rango de valores que están fuera del intervalo de confianza.

Valores críticos: Son las fronteras que limitan la región crítica del intervalo de confianza. El valor crítico superior (Vcs) y valor crítico inferior (Vci) .Existen muchos estadísticos de prueba como los estadísticos **normal (Z)** y **t student (t)**, la elección de uno de estos depende de la cantidad de datos que se toman y si estos son mayores a 30 se utiliza el estadístico **Z**, en caso contrario se utiliza el estadístico **t**. [20]

Los valores críticos se formulan a partir de un error que se da dependiendo de la distribución muestral, dicho error se suma o se resta al valor de la media poblacional ($\mu \pm error$) para generar el intervalo de confianza.

Para una distribución normal (**Z**) de dos colas los valores críticos se calculan a partir de las siguientes ecuaciones*:

$$\text{Valor crítico superior} = \mu + Z_{\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right)$$

$$\text{Valor crítico inferior} = \mu - Z_{\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right)$$

* Ecuaciones tomadas de la página 300 del libro "Introducción a la probabilidad y estadística" de W, Mendenhall [20]

Dónde:

μ = media poblacional

α = nivel de significancia

σ = desviación estándar

n = número de datos

Para una distribución t student (t) los valores críticos se calculan a partir de las siguientes ecuaciones*:

$$\text{Valor critico superior} = \mu + t_{\left(\frac{\alpha}{2}; \nu\right)} \left(\frac{s}{\sqrt{n}} \right)$$

$$\text{Valor critico inferior} = \mu - t_{\left(\frac{\alpha}{2}; \nu\right)} \left(\frac{s}{\sqrt{n}} \right)$$

Donde:

ν = grados de libertad

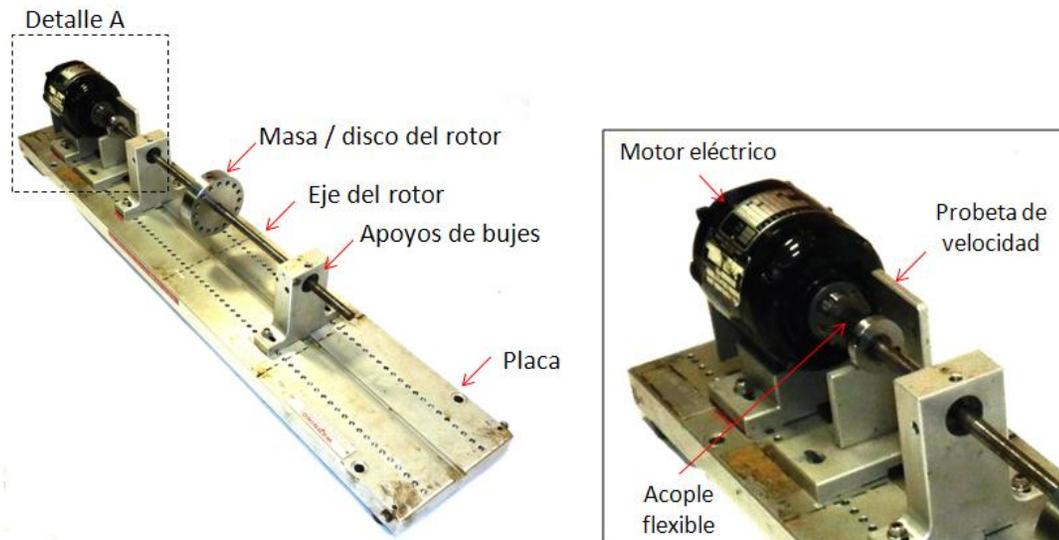
s = desviación estándar para una muestra

* Ecuaciones tomadas de la página 331 del libro R, Weiers, *Introducción a la estadística para negocios*. Quinta Edición. Editorial Thomson. 2006.

1.6 ROTORKIT

Bently Nevada Rotorkit, cuenta con máquinas diseñadas con el objeto de realizar ensayos experimentales (ver Figura 10), que simulen el comportamiento de una rotor maquinaria bajo diferentes configuraciones. Este simulador es especial para propósitos educativos en el área de ingeniería mecánica en el campo del estudio de vibraciones en máquinas. [22][23]

Figura 10. Rotorkit Bently Nevada RK4



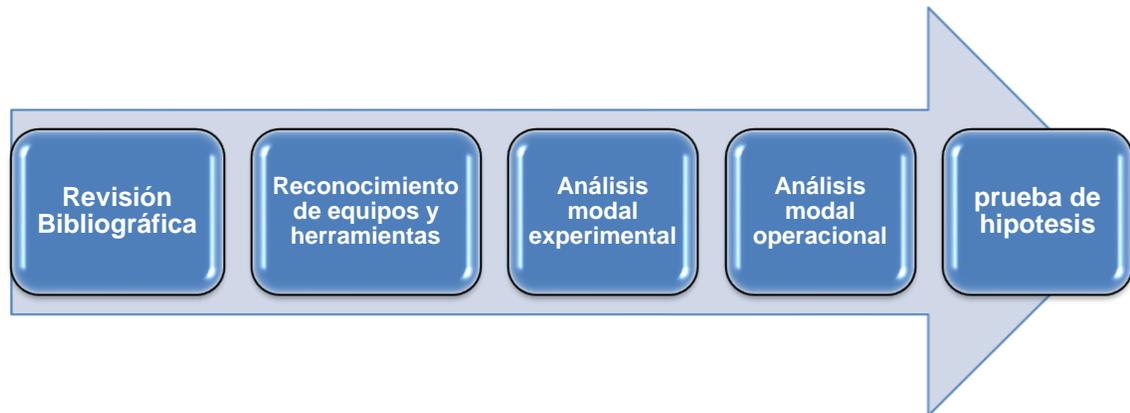
Los rotor kits cuentan con accesorios que permitan al usuario disponer de varias opciones, para llevar a cabalidad dichas tareas de tipo experimental, en las que se puedan determinar aspectos, tales como por ejemplo: La velocidad del rotor, la deflexión del eje, La rigidez del eje, la magnitud y Ángulo de desbalance, La fricción y el golpeo en el eje, análisis de condición de rodamientos o cojinetes.

Una de las grandes ventajas que ofrece este equipo de laboratorio es que permite comparar los resultados reales obtenidos de forma experimental, las cuales podrán ser comparados y validados con modelos analíticos bajo las configuraciones que simulen situaciones como las anteriormente mencionadas. [22][23]

2 METODOLOGIA

Para el desarrollo de esta tesis, se siguió una metodología de forma sistemática, conformada por 5 etapas (ver Figura 11) para alcanzar los objetivos planteados en este trabajo de grado

Figura 11. Etapas de la metodología



A continuación se describe como se llevó a cabo cada una de estas etapas, de forma más detallada:

2.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Se realizó una consulta bibliográfica enfocada a los temas del análisis modal y la prueba de hipótesis, con el objeto de afianzar los conceptos esenciales a tener en cuenta para las siguientes fases en el desarrollo de la presente tesis. Para ello fue necesario, en una primera instancia, realizar una indagación acerca del significado de los parámetros modales (frecuencia natural, forma modal y amortiguamiento) y de cómo estos parámetros son determinados por medio de un análisis modal experimental, principalmente. De igual manera, se consultó acerca de los tipos de excitación que se emplean en los ensayos modales, para obtener de forma grafica las Funciones de respuesta en frecuencia (FRF) y cómo interpretar la información contenida en ella. En cuanto al análisis modal operacional (OMA), uno de los

principales temas de este proyecto, se realizó una consulta básica acerca de este método, con el fin de entender sus diferencias, ventajas y limitaciones con relación al EMA. Paralelamente a esta consulta de conceptos, se ejecutó una revisión del estado actual de la tecnología a nivel global acerca del análisis modal, con la intención de tener información acerca de otros estudios, proyecciones y tendencias que se ha venido dando en el transcurso del tiempo en cuanto a lo que refiere a este tipo de estudios.

En una segunda instancia, se realizó una consulta acerca de los procedimientos básicos que se deben seguir para realizar una prueba de hipótesis, basada en la información recolectada en una determinada muestra o conjunto de datos.

Estas consultas se hicieron, por medio de la revisión de libros, papers científicos, tesis de grado, sitios webs, base de datos, y entrevistas con autoridades en el tema. En lo referente al software ARTeMIS se realizó un webinar por Palle Andersen de structural vibration solution, creador y proveedor de la licencia del software utilizado en OMA, desde Dinamarca especialmente para el laboratorio de sonido y vibraciones de la UPB-Bucaramanga.

Cabe aclarar, que el porcentaje de investigación realizado fue algo limitado en comparación al vasto compendio existente de los temas propios del análisis modal, como la forma en que se ha desarrollado el análisis modal experimental y el análisis modal operacional.

2.2 RECONOCIMIENTO DE EQUIPOS Y HERRAMIENTAS

Una vez finalizada la revisión bibliográfica, se realizó un reconocimiento de los equipos, herramientas e instrumentación empleada para los ensayos modales (EMA) y la grabación de datos (respuesta vibratoria) que son posteriormente procesados en el OMA.

La labor de reconocimiento inició identificando los equipos e instrumentos disponibles en el laboratorio, los cuales se emplean para realizar los ensayos modales (Figura 12). Dentro de estos equipos e instrumentos se encuentran el

shaker electromagnético (Figura 12A) y el martillo de impacto o Hammer (Figura 12B), los cuales se emplean para excitar de diferentes forma el sistema en el ensayo modal; igualmente se dispone de los acelerómetros, sensores piezoeléctricos de aceleración y fuerza, que miden y transmiten las señales mecánicas, por medio de los cables (Figura 12C), hacia uno o varios módulos de adquisición de la marca National instruments, todos ellos acoplados en un carrier que se conecta por vía usb al computador (Figura 12D).

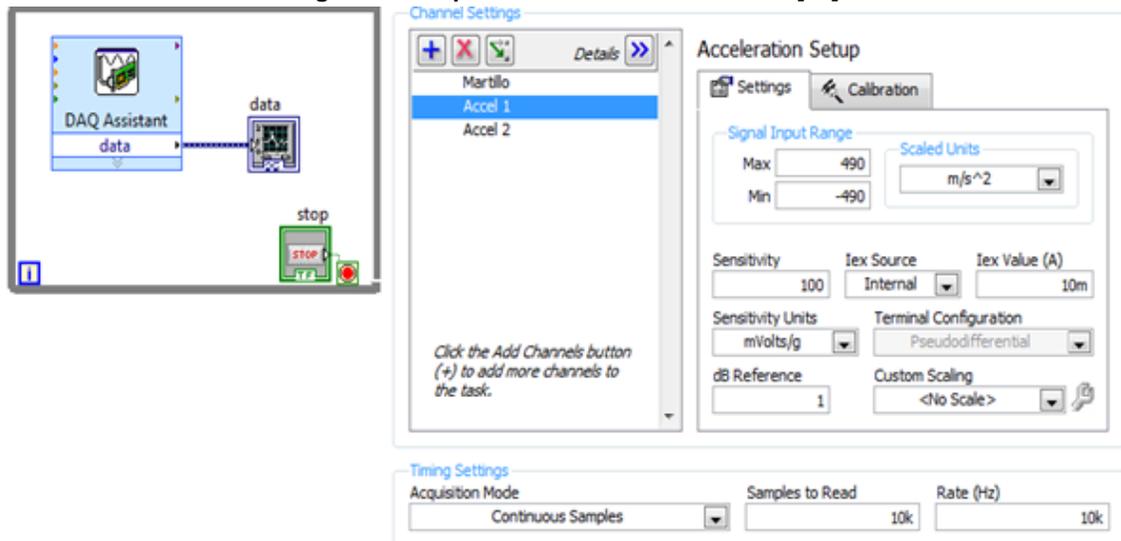
Figura 12 Equipos e instrumentos para ensayo modal en EMA



Para el funcionamiento del Shaker se utiliza un módulo generación que está conectado en el mismo carrier del módulo de adquisición (Figura 12D), para enviar la señal generada en el computador hacia un amplificador de potencia (Figura 12E) que magnifica la señal y la envía finalmente al shaker.

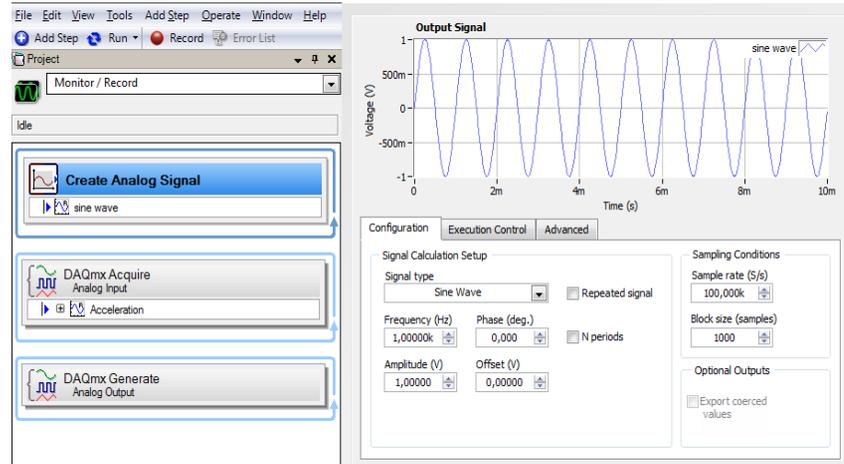
Posteriormente se llevó a cabo el manejo de algunos programas creados a partir del toolkit de sonido y vibración, de la plataforma del software de LabVIEW 2009, con el que cuenta la universidad. Como primera medida, se realizaron tareas guiadas a adquirir señales de los sensores piezoeléctricos (acelerómetros y sensor fuerza) y del hammer (martillo de impacto), para ello fue necesario ingresar al diagrama de bloques que se observa en la Figura 13, y de esta manera realizar las configuraciones para cada uno de los sensores empleados

Figura 13. Adquisición de datos en Labview [28]



Después de lograr adquirir señales de los sensores, se procede, por medio del software de NI "sound and vibration assistant" a crear y generar señales de tipos sinusoidales y aleatorios, que se amplifican y se reproducen en el shaker electromagnético (Figura 14)

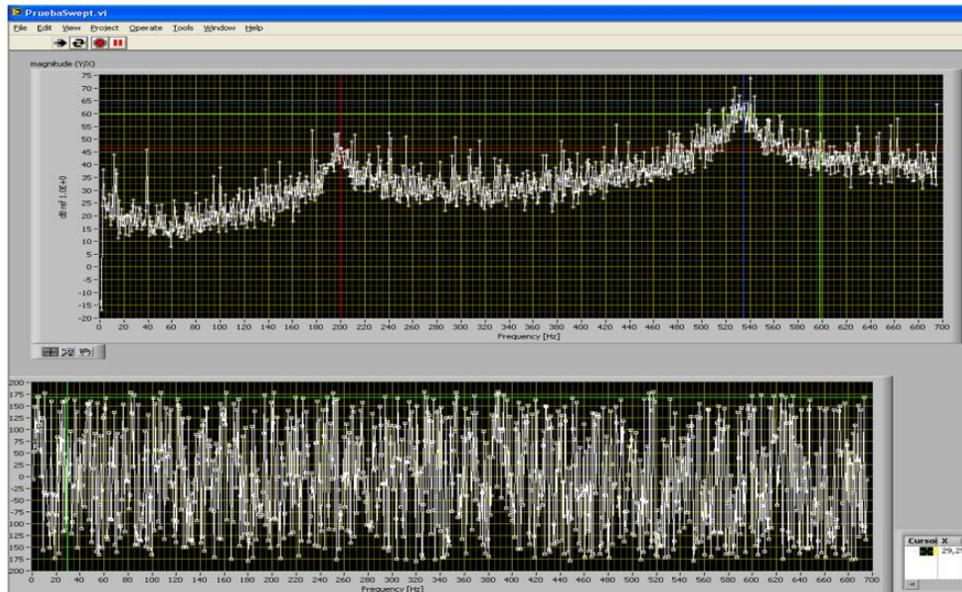
Figura 14. Programa para el shaker en Labview. [28]



Para la ejecución de los ensayos modales en los sistemas placa, eje y Rotorkit, ya teniendo conocimiento básico de cómo crear, adquirir y generar señales, tanto en *LabVIEW 2009* y *sound and vibration assistant*, se añaden algunas funciones en los programas ya existentes, especialmente para guardar y exportar los datos de los espectros. De igual modo, se realiza una mejora en la interfaz gráfica, facilitando la identificación y organización de los resultados obtenidos. (ANEXOS A)

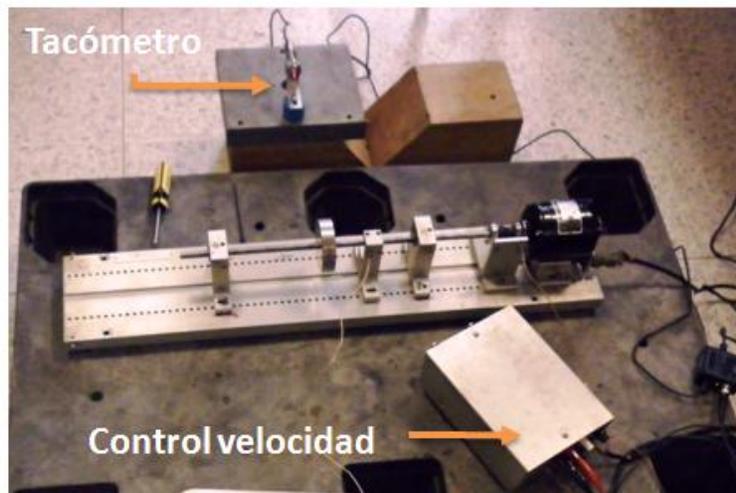
Finalmente, se realizó unas pruebas pilotos, en los sistemas, para tener un conocimiento básico acerca de los aspectos importantes para la ejecución de la próxima etapa EMA, y así mitigar futuros inconvenientes con la instrumentación y los montajes. Como por ejemplo en la Figura 15, donde se identifica que el espectro se ve afectado dado por un ruido presente en el cable que transmite la señal, producto del daño del mismo.

Figura 15. Espectro de la FRF de placa con cable averiado. [28]



Paralelamente, se hacen ensayos para reconocer el funcionamiento del Rotorkit de Bently Nevada, especialmente el control de velocidad y además el tacómetro del fabricante OROS que son empleados para las mediciones en la etapa del análisis modal operacional (Figura 16).

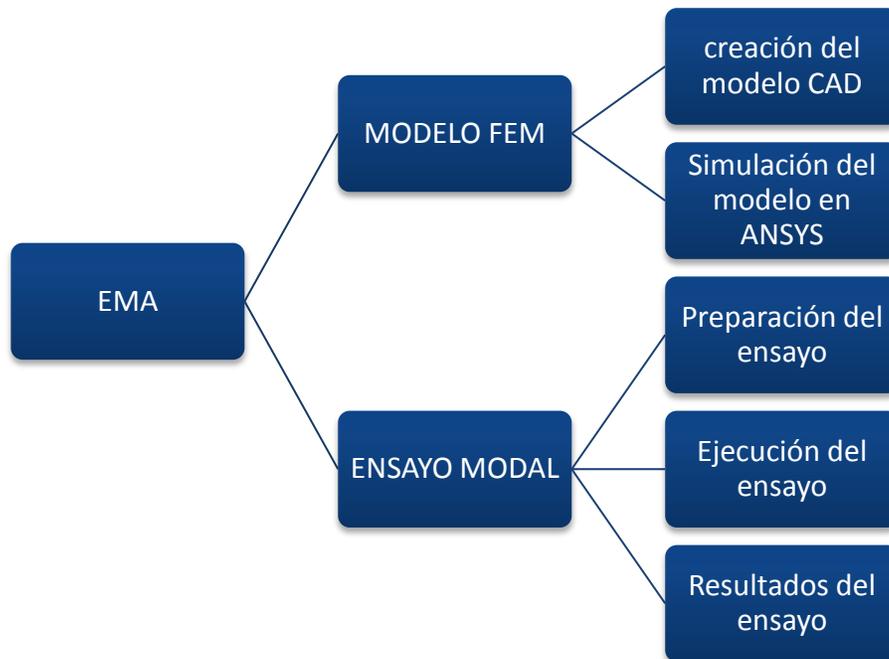
Figura 16. Rotor kit



2.3 ANÁLISIS MODAL EXPERIMENTAL

En este punto se ejecutaron los ensayos modales, basados en la metodología propuesta a partir de los ensayos pilotos que se llevaron a cabo, la cual es expuesta en esta sección. Dicha metodología, aplicada en cada uno de los análisis modales experimentales, está conformada por las fases descritas en la siguiente figura:

Figura 17. Metodología para EMA

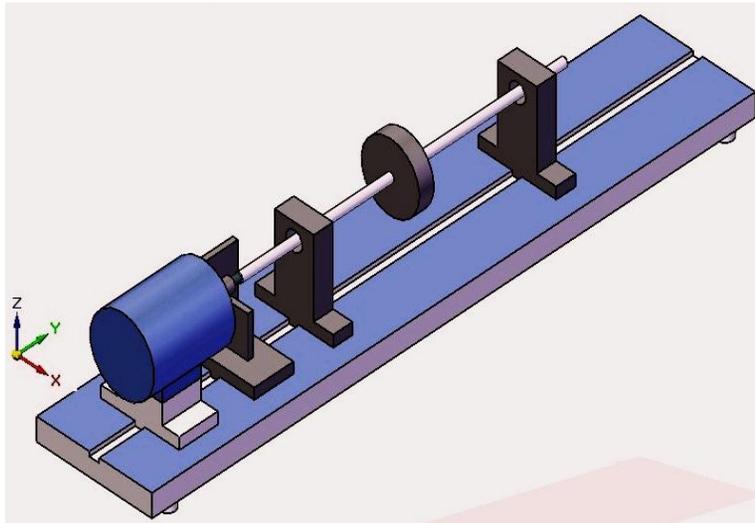


2.3.1 Modelo FEM

2.3.1.1 Creación del modelo CAD

Se hizo el modelamiento CAD del Rotorkit y sus partes, esto como primera tarea encaminada a obtener un modelo FEM. Este modelo está conformado por la placa, el disco, el eje, los apoyos, el motor y otros elementos. A continuación se observa desde una vista isométrica el modelo CAD del Rotorkit.

Figura 18. Modelo CAD del Rotorkit



En este modelo con relación al original, se realizaron unas simplificaciones de la geometría del motor y el acople, en ambos casos se representaron como elementos cilíndricos, cuyas dimensiones fueron modificadas tales que la masa de ambos elementos no cambiara con relación a las piezas originales. De esta forma, se busca no modificar la rigidez que estos brindan al sistema en general.

Otro de los cambios realizados en el modelo CAD, fue suprimir los agujeros en la placa, las ranuras y los tornillos de los apoyos.

2.3.1.2 Simulación en ANSYS

Se realizó el análisis modal FEM en el software ANSYS, ingresando al módulo de “Modal Analysis”, en donde se Importa el archivo CAD, después se definen las propiedades físico-mecánicas de los materiales de las piezas que conforman el sistema, luego se empleó un mallado automático y se realizaron ajustes como el número de modos a estimar.

Finalmente, se da solución al modelo para determinar los distintos modos vibratorios calculados. (Ver ANEXO B), permitiendo de esta forma brindar una información preliminar acerca de los parámetros modales, especialmente la forma modal a las distintas frecuencias naturales; con esto es posible identificar algunas

zonas representativas, donde se realizan mediciones, especialmente aquellas donde se dan las máximas amplitudes de movimiento, y por ende se puedan observar claramente los picos de frecuencia (frecuencias naturales), que para la presente tesis, son el parámetro modal de interés.

En la Figura 19 y la Figura 20, se observan dos de los modos vibratorios que fueron determinados con ANSYS en el Rotorkit [27].

Figura 19. Tercer modo vibratorio del Rotorkit

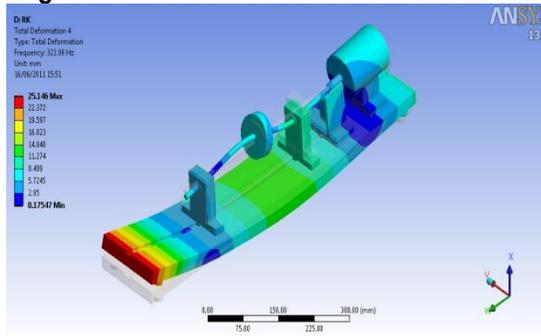
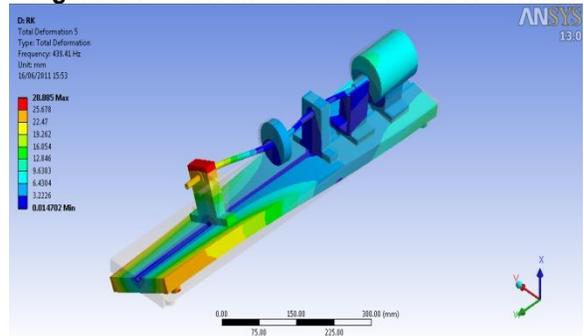


Figura 20. Cuarto modo vibratorio del Rotorkit



2.3.2 Ensayo modal

2.3.2.1 Preparación del ensayo modal

Una vez definidos los puntos sobre los cuales se realizan las mediciones, y por ende los modos de interés a estimar a partir de los ensayos modales, se crean sobre el eje, placa y Rotorkit sistemas de referencia donde se informan los puntos de estímulo y respuesta; con esto es posible identificar los puntos sobre los cuales se miden las distintas FRF's, permitiendo posteriormente, con toda la información contenida en dichos espectros, estimar las formas modales en las distintas frecuencias naturales (picos de frecuencia) a un determinado ancho de banda.

En la Figura 21 se observa, el sistema de referencia asumido para el Rotorkit, desde una vista de planta, el cual está definido como una matriz 5x3, donde las columnas están dadas desde la letra A hasta la letra E, mientras las filas están dadas desde el número 1 hasta el número 3. En la Figura 22 se muestran los dos apoyos que también fueron incluidos en el sistema de referencia.

Figura 21. Sistema de referencia del Rotorkit, vista de planta

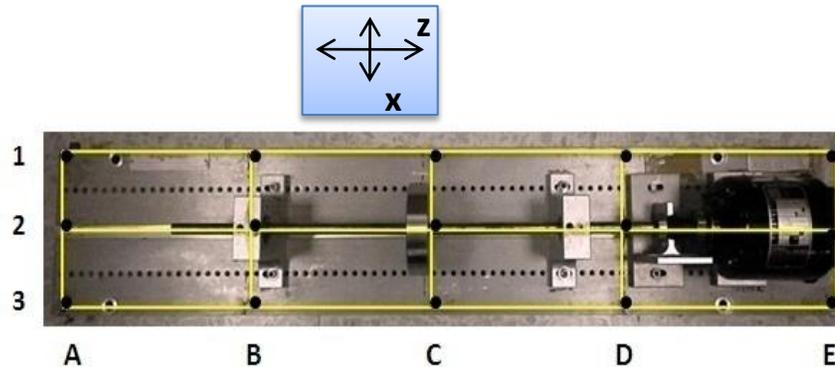
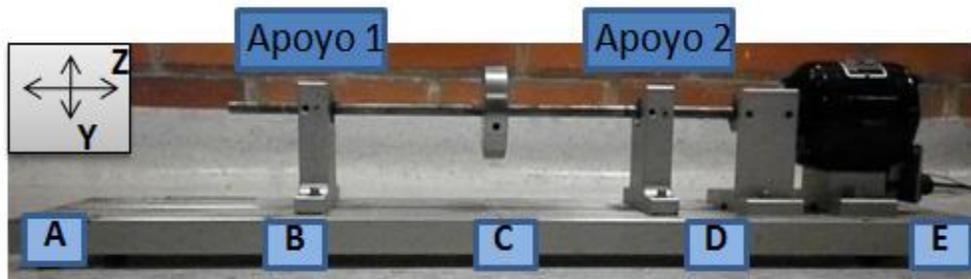


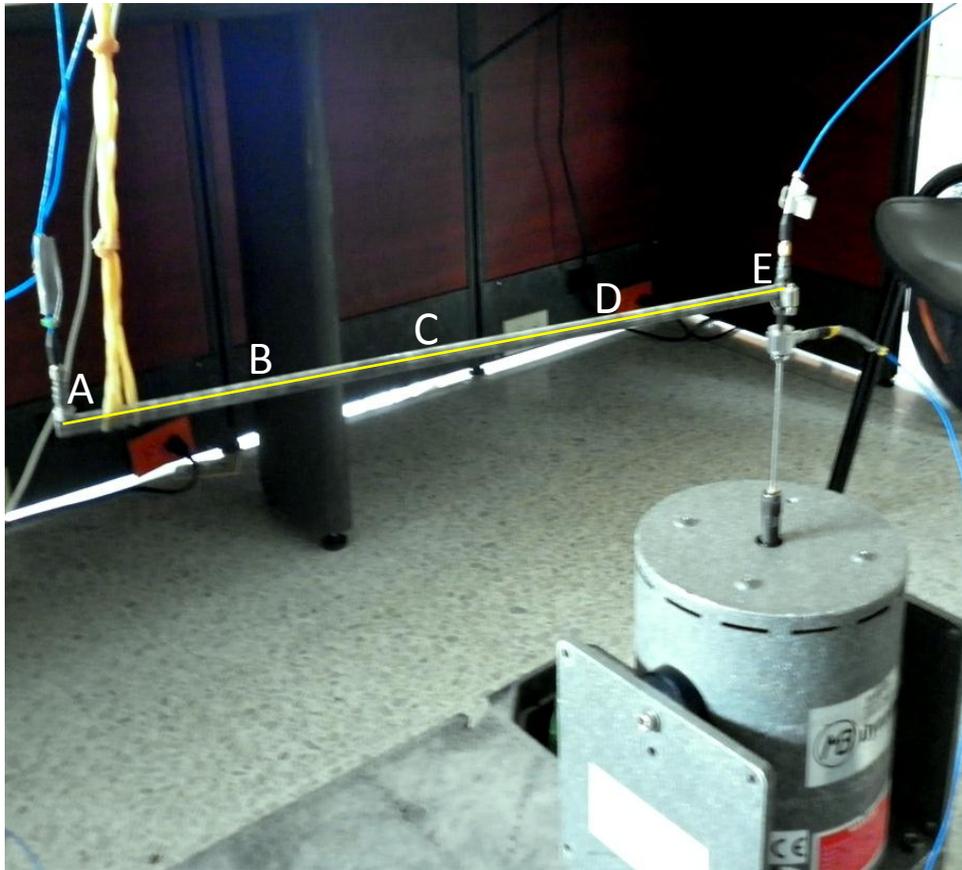
Figura 22. Sistema de referencia del Rotorkit, vista frontal



Para la placa con motor y placa sin motor, se utilizó el mismo sistema de referencia del Rotorkit, que muestra la Figura 21.

En cuanto al eje se realizaron dos montajes, el primero se observa en la Figura 23 para los ensayos modales empleando el shaker, junto con su sistema de referencia, el cual se constituye a partir de 5 puntos identificados por medio de letras desde la A hasta la E.

Figura 23. Sistema de referencia del eje sobre ligas.



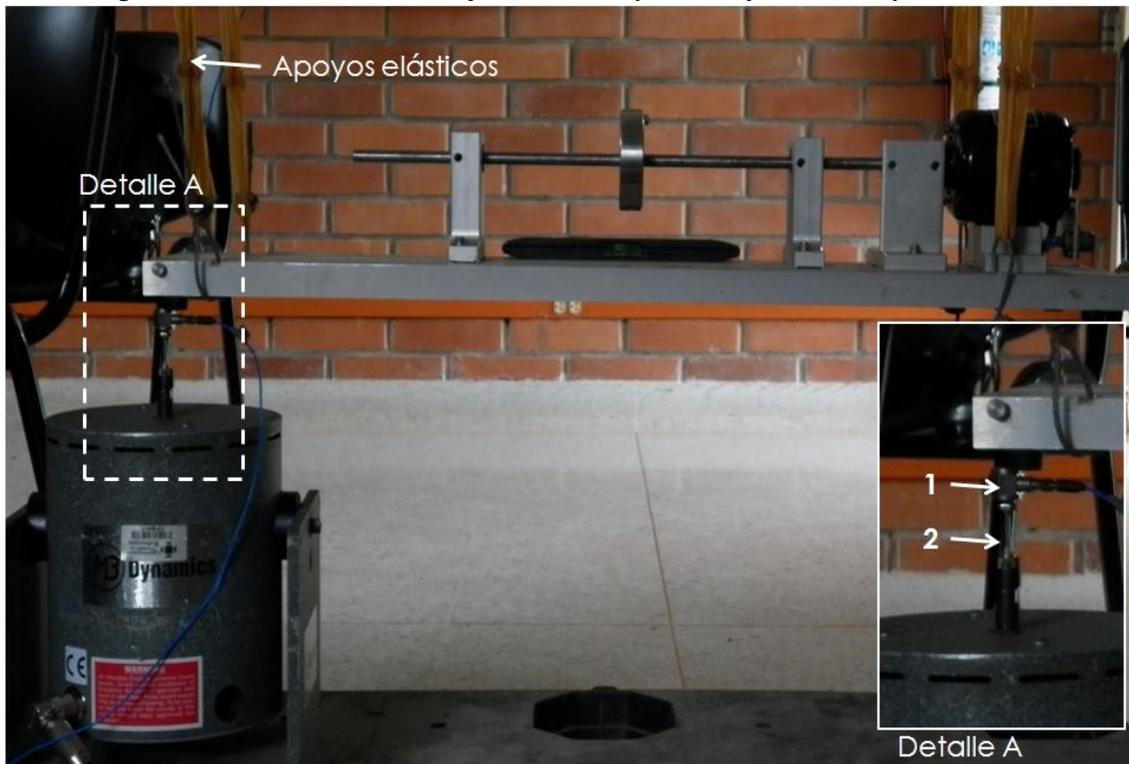
El segundo montaje del eje para los ensayos modales por impactos, en el que se conservan los 5 puntos de referencia, como se puede observar en la siguiente figura.

Figura 24. Sistema de referencia del eje en shaker.



Una vez definidos los sistemas de referencia para las mediciones en los distintos montajes, se procedió al acondicionamiento de los equipos e instrumentación que se emplean para realizar cada una de las mediciones. El montaje del Rotorkit y de la placa (con y sin motor) se hace de forma similar, los cuales se suspenden en apoyos elásticos, conformados por una trenza de bandas elásticas (ver Figura 25). Siempre que se utilice el shaker como medio de excitación se debe alinear los ejes o nivelar la placa, con relación al vástago del mismo antes de conectarlo, esto para no generar esfuerzos de flexión sobre dicho elemento. Como última medida, se conecta el vástago al sensor fuerza (ver Figura 25 *Detalle A*) y este a su vez se acopla a la placa, por medio de un tornillo prisionero sin cabeza.

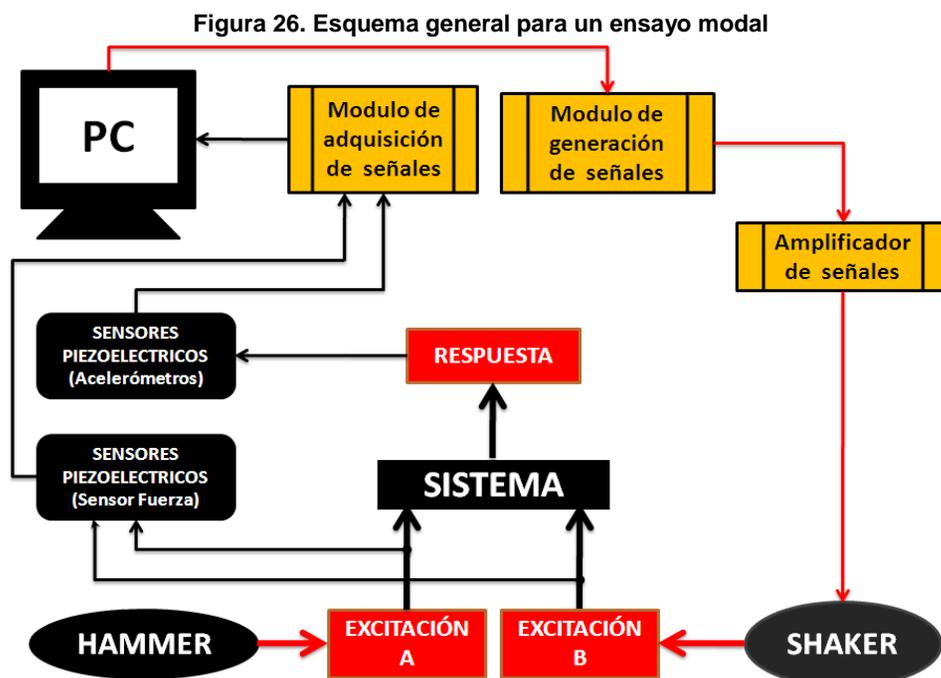
Figura 25. Vista lateral del montaje del Rotorkit para ensayo modal empleado el shaker



Para ver las fotos de los montajes realizados en el laboratorio para EMA ver ANEXO C.

En la Figura 26, se aprecia un esquema general de la forma como se acondiciona y se ejecuta el ensayo modal, uno de los elementos principales son el computador (PC), por medio del cual se controla todo el proceso desde la creación, la adquisición, la generación, el procesamiento y la visualización de las señales, todo esto por medio de los programas creados en la plataforma de LabVIEW. Otro de los elementos importantes son los sensores empleados para adquirir la señal, en los ensayos se emplearon sensores piezoeléctricos del fabricante PCB, para medir las señales de entrada (sensor fuerza del shaker) y señales de salida (acelerómetros), conectados al sistema (Rotorkit, placa o eje).

Los equipos utilizados para excitar los sistemas corresponden al shaker electromagnético (para señales periódicas y aleatorias) y al hammer (para señales de impulso). Por último, se muestra los modulo de adquisición, generación y amplificador de señales, que permiten la comunicación entre lo que se está midiendo con lo que se está procesando o generando a partir del PC.

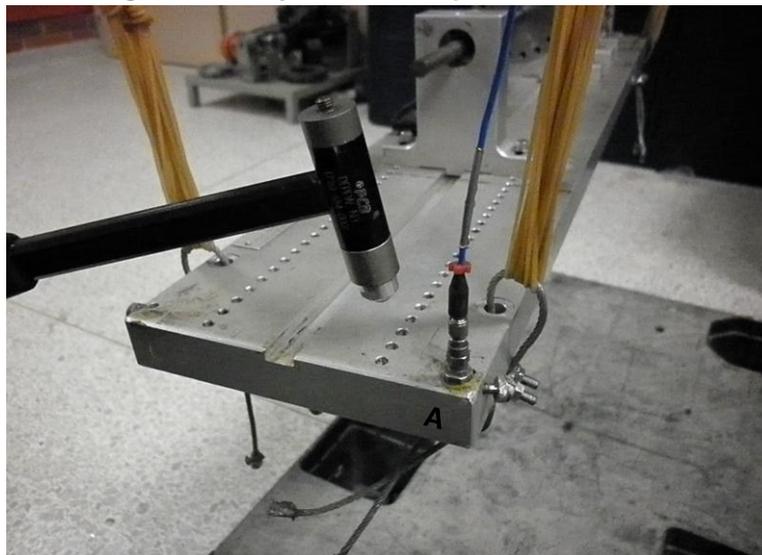


En cuanto al diagrama de bloques de los programas utilizados para los ensayos en Labview, remitirse al ANEXO A.

2.3.2.2 Ejecución del ensayo modal

Previamente a ejecutar el ensayo modal, una vez finalizado el montaje e instalación de la instrumentación, se elige el tipo de excitación que se emplea para obtener los espectros de las FRF's, en diferentes puntos definidos anteriormente con el sistema de referencia. A continuación se excita y se capturan los espectros. Para el eje, la placa y el Rotorkit se desarrollan los ensayos mediante excitación sinusoidal, aleatoria (ruido gaussiano) e impacto, excepto en la placa con motor, donde solo se realizó ensayo de impacto, ya que este sistema no es prioritario, de acuerdo a los objetivos propuestos en la presente tesis.

Figura 27. Ensayo modal de impacto en el Rotorkit



En la Figura 27, se observa el ensayo modal de impacto realizado sobre el rotorkit, donde se excita y se mide la respuesta en el punto A3. Una vez adquiridas las señales de entrada (hammer) y salida (acelerómetro), por medio de Labview, se visualizan el espectro de la FRF obtenida en este punto (Figura 28), en el se ubican los cursores en los picos de frecuencia, especialmente aquellos, en los que haya un cambio de fase de 180° respectivamente. Esto último, puede observarse claramente en el espectro mostrado en la Figura 29, en la que se observa en la parte superior la gráfica magnitud contra frecuencia, donde se identifican los picos de frecuencia relativos a las frecuencias naturales, mientras en la parte inferior del

mismo espectro se visualiza, el diagrama de fase contra frecuencia, en el cual se observa el cambio de fase a una determinada frecuencia natural. En ese espectro, se observa claramente, a un ancho de banda de 0 a 1250 hz, dos frecuencias naturales alrededor de los 182 hz y 338 hz, esto puede corroborarse en el diagrama de fase, ya que se aprecia que en ambos caso existe un cambio de fase de 180° . El cambio que se efectúa en ambas frecuencias desde 0° a 180° .

Figura 28. FRF del punto A3 rotor kit [27]

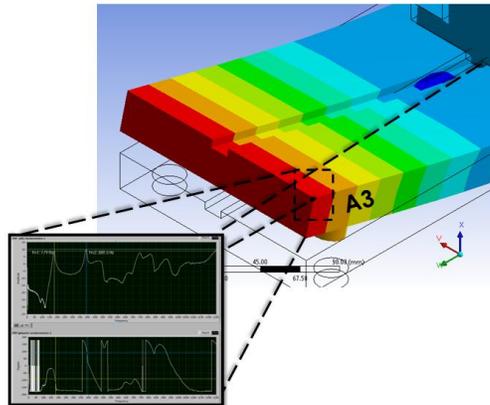
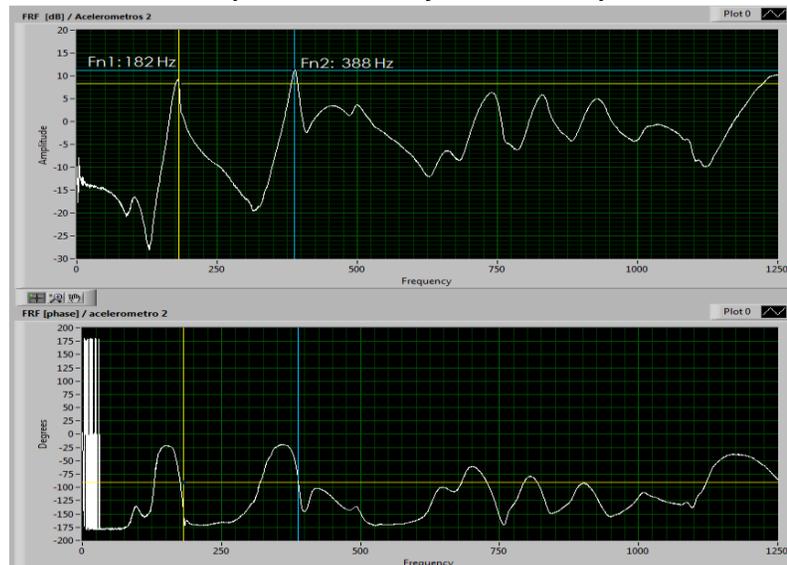


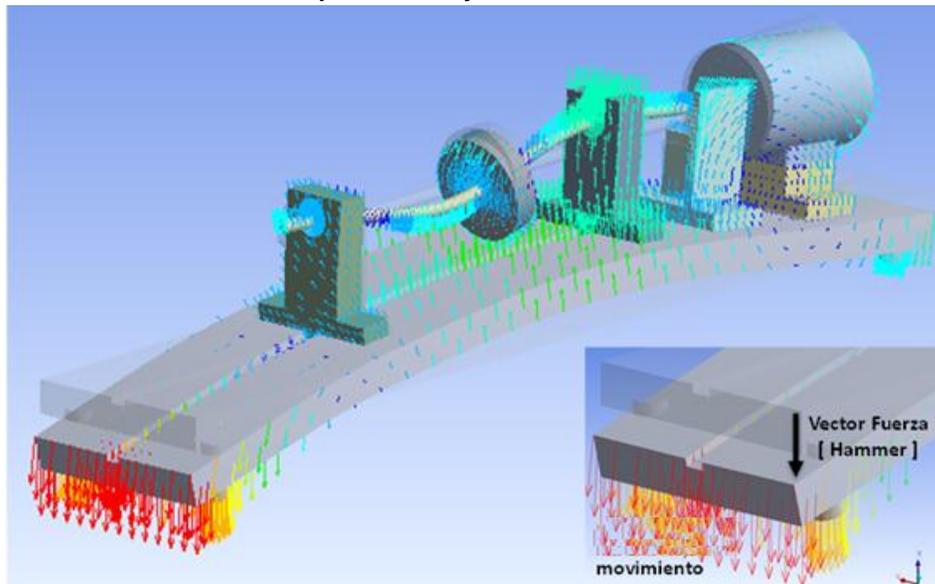
Figura 29. FRF obtenida a partir de un ensayo modal de impacto en el Rotorkit. [28]



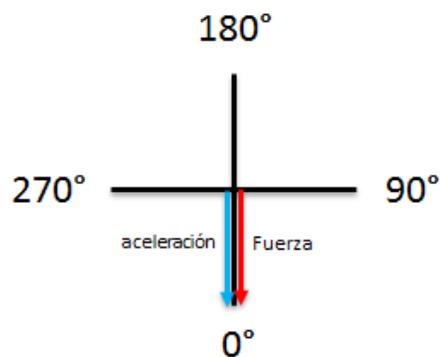
2.3.2.3 Resultados del ensayo modal

El movimiento del punto A3, para la primera frecuencia natural, de acuerdo a lo observado en la fase expuesta en la Figura 29, va en la misma dirección de la fuerza aplicada por el hammer. (Ver Figura 30)

Figura 30. Fase entre la dirección del desplazamiento y la dirección del golpe, para el primer modo vibratorio. (a) Dirección de desplazamiento. [27] (b) Ángulo de fase entre la dirección de desplazamiento y dirección fuerza.



(a)



(b)

Al terminar todas mediciones para esta configuración, se procede a realizar una tabla con los datos en Excel, donde se señalan los lugares de estímulo y respuesta, se muestran los valores de los picos de frecuencia y su respectivas

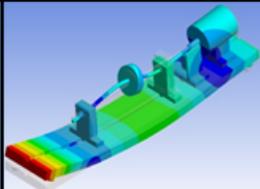
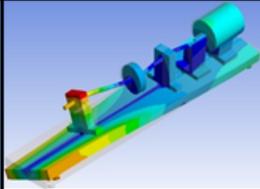
fases, esto con el fin de tener una base de datos sobre la que se puedan calcular los estadísticos de las pruebas. (Ver Figura 30)

Tabla 1. Datos experimentales de prueba modal de impacto en el Rotorkit

ENSAYO MODAL / Prueba modal impacto Rotorkit					
	Ubicación acelerómetros	Picos de Frecuencias			
		Pico 1	Fase 1	Pico 2	Fase 2
Golpe A3	A3	182	0	388	0
	A3	177	0	388	0
	A3	180	0	388	0
	A1	179	0	385	180
	A1	176	0	389,5	180
	A1	179	0	389,5	180
	A1	176	0	389,5	180

Finalmente con los resultados contenidos en la base de datos en Excel y con los resultados calculados en ANSYS, se genera la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, donde se sintetizan los resultados experimentales.

Tabla 2. Ejemplo de los resultados de EMA. [27]

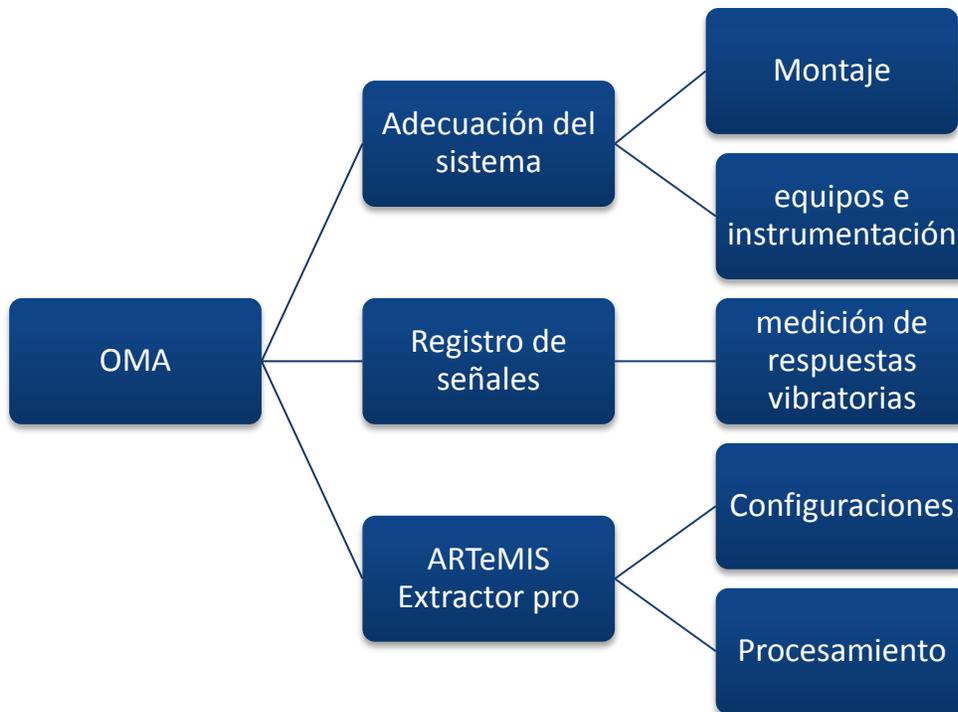
Resultados EMA- ROTORKIT					
	Forma modal	Tipo de excitación	Frecuencia promedio (Hz)	Desviación Estandar (Hz)	Error (Hz)
1° MODO		Barrido sinusoidal	174.73	0	0
		Excitación aleatoria	177.15	4.10	1.68
		Excitación por impacto	178.73	2.43	0.55
2° MODO		Barrido sinusoidal	391.85	0.213	0.11
		Excitación aleatoria	388.45	6.01	2.66
		Excitación por impacto	392.33	3.75	1.06

* Se aclara que los resultados dados por el software ANSYS son una ayuda para imaginar tanto las formas modales, como los valores aproximados de las frecuencias a las que corresponde

2.4 ANÁLISIS MODAL OPERACIONAL

Para el desarrollo de un análisis modal operacional (OMA) con el software ARTeMIS, se llevó a cabo la metodología que se expone en la siguiente figura:

Figura 31. Metodología para OMA con ARTeMIS



2.4.1 Adecuación del sistema

2.4.1.1 Montaje:

Los montajes en todos los sistemas para el análisis modal operacional (OMA) fueron los mismos que se emplearon en la anterior etapa del análisis modal experimental (EMA). (Ver sección 2.3.2.1 Preparación del ensayo modal)

Figura 32. Montaje para OMA en Rotorkit



Para ver las fotos de los montajes realizados en el laboratorio para OMA ver ANEXO F

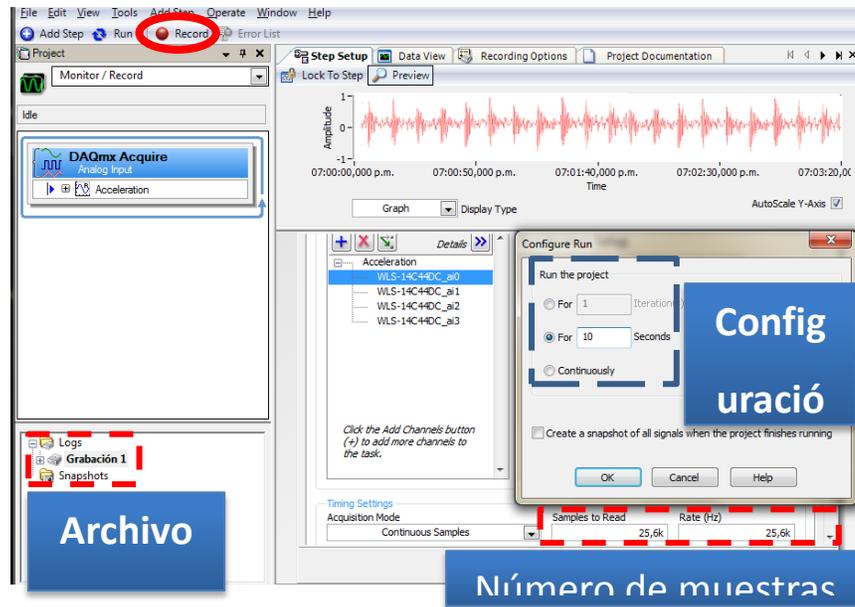
2.4.1.2 Equipos e instrumentación:

Se emplea la misma instrumentación para adquirir las señales, que se utilizó en la fase EMA (acelerómetros, cable coaxial, tarjeta de adquisición, ver Figura 12).

El software empleado fue *NI sound and vibration assistant*, donde se realizaron las grabaciones de las señales en dominio en el tiempo.

En la Figura 33, se observa la forma en que se configura el software para la grabación de los datos, donde se define el tiempo de grabación, los parámetros de muestreo entre otros.

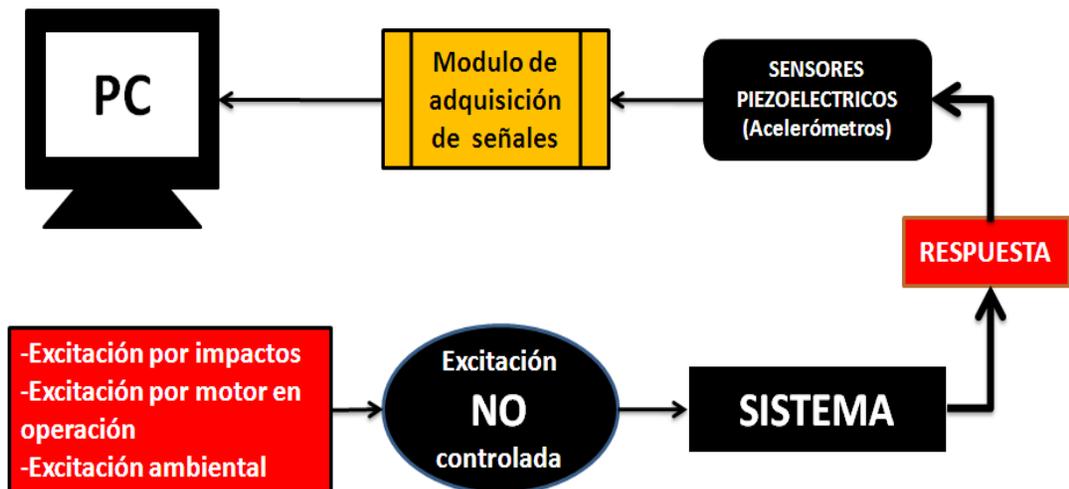
Figura 33. Programa de NI sound and vibration assistant para grabación de señales. [28]



2.4.2 Registro de señales

2.4.2.1 Medición de respuestas vibratorias:

Figura 34. Esquema general para registro de señales en OMA



La Figura 34 describe el procedimiento llevado a cabo para la grabación de datos en operación, en el cual no hay control sobre las excitaciones en el sistema. En los casos específicos del eje y la placa, las excitaciones fueron dadas por impactos y por señales periódicas aplicadas con el shaker, mientras que para los sistemas de placa con motor y Rotorkit, la fuente de excitación fue dada por el motor en funcionamiento. Para operar el motor se utilizó el control de velocidad de lazo cerrado y el tacómetro laser, los cuales se observan en la Figura 35.

Figura 35. Equipos utilizados para control de velocidad en OMA rotorkit



Las mediciones se realizaron en todos los puntos de los sistemas de referencias, definidos previamente en los ensayos modales para la placa, placa con motor, eje y Rotorkit (Ver Figura 21, Figura 23 y Figura 24).

Una vez que haya acondicionado el sistema a evaluar, se procede a utilizar el software de *NI sound and vibration assistant*, para realizar la grabación de la señal del dominio en el tiempo, la cual es guardada y posteriormente exportada a un archivo ACII (.txt).

2.4.3 ARTeMIS extractor pro.

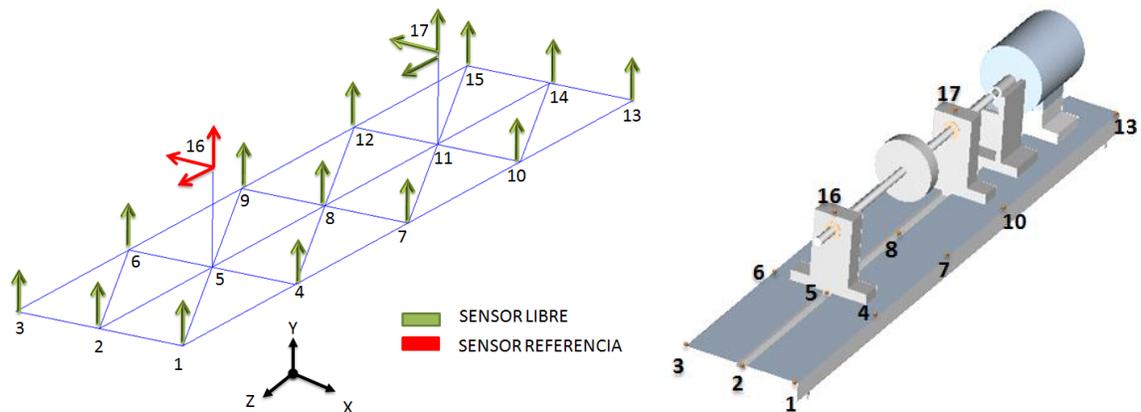
En la etapa del OMA, se empleó el software ARTeMIS Extractor PRO, creado por la empresa Structural vibration solution, para el procesamiento de las respuestas vibratorias que fueron registradas en la anterior etapa. El empleo de este software se llevó a cabo, de acuerdo a las indicaciones que ofrece el fabricante por medio de “ARTeMIS Extractor Online Help”.

A continuación se describe de forma sintetizada como se desarrolló este proceso:

2.4.3.1 Configuraciones en ARTeMIS

De acuerdo a los puntos donde se realizaron las mediciones, se definen la ubicación de los sensores, (libres y de referencia) así como la dirección en la que señal es medida de acuerdo a un sistema cartesiano definido por el usuario. Esto se observa en la Figura 36, para el caso específico del rotor kit.

Figura 36. Sistema de referencia ARTeMIS para mediciones de respuesta en Rotorkit



Los sensores de referencia son, de gran importancia ya que por medio de ellos, en forma operacional, ARTeMIS los emplea para procesar la señal y de esta forma dar información acerca de las formas y las frecuencias.

La creación del archivo *.SVS, propio del software ARTeMIS Extractor, puede generarse de tres formas, ya sea por medio de un sistema que permita almacenar la información en un archivo *.UFF, por el ARTeMIS Testor software, o manualmente en un editor de texto (ejemplo, Notepad o Wordpad). Este último fue empleado para crear los archivos de las mediciones realizadas sobre los sistemas que se analizan en este trabajo de grado, para posteriormente ser procesados por el software; ya que no se contaba con el software ARTeMIS Testor, el cual fue especialmente diseñado para realizar esta tarea.

En la Figura 37, se muestra el archivo *.SVS construido a partir del editor de texto creado para el rotorkit, el cual está constituido por un encabezado, donde se da una información general acerca del proyecto; el periodo de muestreo, que se corresponde a la inversa de la frecuencia de muestreo de la adquisición de la señal; los nodos, donde se definen las coordenadas de los puntos de medición, las cuales se mostraron en la Figura 36; las líneas, las superficies y la información acerca de la configuración de las mediciones realizadas.

Con relación a la configuración de las mediciones, se debe estipular el nombre del archivo de la medición con la extensión a la que corresponda (ejemplo, medición1.txt). Posteriormente, en columnas se indican los nodos, los vectores unitarios, el valor de referencia y las unidades, en que fueron realizadas las mediciones. De igual forma, se define cuáles de los puntos, donde se realizaron dichas mediciones, se ubicaron los sensores libres o sensores referencia. (Ver Figura 38)

Figura 37. Archivo *.SVS

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

Structural Vibration Solutions A/S - www.svibs.com

SVS Configuration File written for PC system
File was generated by ARTEMIS Testor version 3.2

Header
Rotor kit sobre ligas- 1500 rpm

4.00E-05

Nodes

1	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
2	0.0000E+00	7.5000E-02	0.0000E+00
3	0.0000E+00	1.5000E-01	0.0000E+00
4	1.9700E-01	0.0000E+00	0.0000E+00

15 7.8600E-01 1.5000E-01 0.0000E+00
16 1.9700E-01 7.5000E-02 8.0000E-02
17 5.9000E-01 7.5000E-02 8.0000E-02

Lines

1	2
2	3
4	5
5	6
7	8
8	9
10	11
11	12

5 16
11 17

Surfaces

1	5	2
2	6	3
4	8	5
5	9	6
7	11	8
8	12	9
10	14	11
11	15	12
5	1	4
6	2	5

15 11 14

Setups
Measurement 1
1,3,Ap1y,Ap1x,Ap1z.txt

1	0.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	m/s ²	Acceleration	Transducer 1
3	0.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	m/s ²	Acceleration	Transducer 2
16	0.00E+00	1.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	m/s ²	Acceleration	Ref. Transducer 1
16	1.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	m/s ²	Acceleration	Ref. Transducer 2
16	0.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	m/s ²	Acceleration	Ref. Transducer 3

Figura 38. Setup del archivo de medición en *.SVS

Setups	Measurement 1	1,3,Ap1y,Ap1x,Ap1z.txt						
1	0.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	m/s ²	Acceleration	Transducer 1	
3	0.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	m/s ²	Acceleration	Transducer 2	
16	0.00E+00	1.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	m/s ²	Acceleration	Ref. Transducer 1	
16	1.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	m/s ²	Acceleration	Ref. Transducer 2	
16	0.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	m/s ²	Acceleration	Ref. Transducer 3	

nodos	X unitario	Y unitario	Z unitario	Valor Referencia	Unidades	Tipo de medida	Vector de referencia
-------	------------	------------	------------	------------------	----------	----------------	----------------------

2.4.3.2 Procesamiento de datos en ARTeMIS

Para importar el archivo creado en el editor ASCII en la anterior etapa, debe seleccionarse la opción “SVS configuration file”, que se muestra en la Figura 39. Posterior a ello, se define un rango de frecuencia para un análisis modal preliminar hecho por el software (ver Figura 40), que depende del periodo de muestreo de la mediciones grabadas.

Figura 39. Creación de proyecto en ARTeMIS. [12]

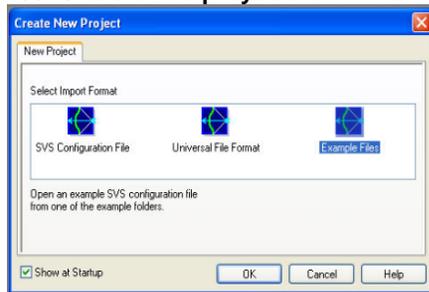
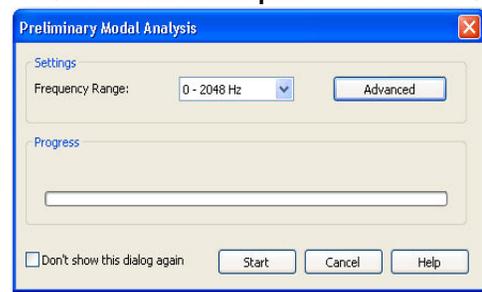


Figura 40. Análisis modal preliminar ARTeMIS. [12]



Las señales procesadas por los distintos métodos SSI-UPC y EFDD, empleados para extraer los parámetros modales en los distintas sistemas (placa, placa con motor, eje y Rotorkit), pueden ser visualizados seleccionando las pestañas SSI y FDD que se encuentran el “task bar”. (Ver Figura 41). En este task bar o barra de tareas, se pueden visualizar otros aspectos tales como el *signal processing data*, donde se realizan configuraciones adicionales para el procesamiento de los datos, como se muestra en la Figura 42.

Figura 41. Task Bar . [12]



Figura 42. Control de procesamiento de señal. [12]

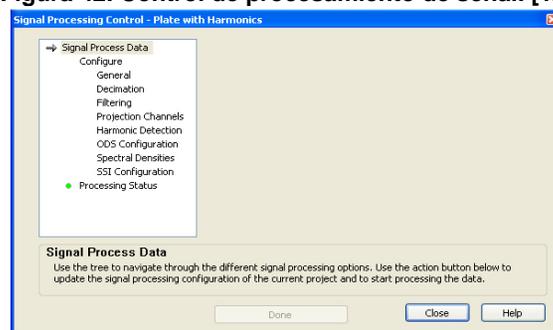
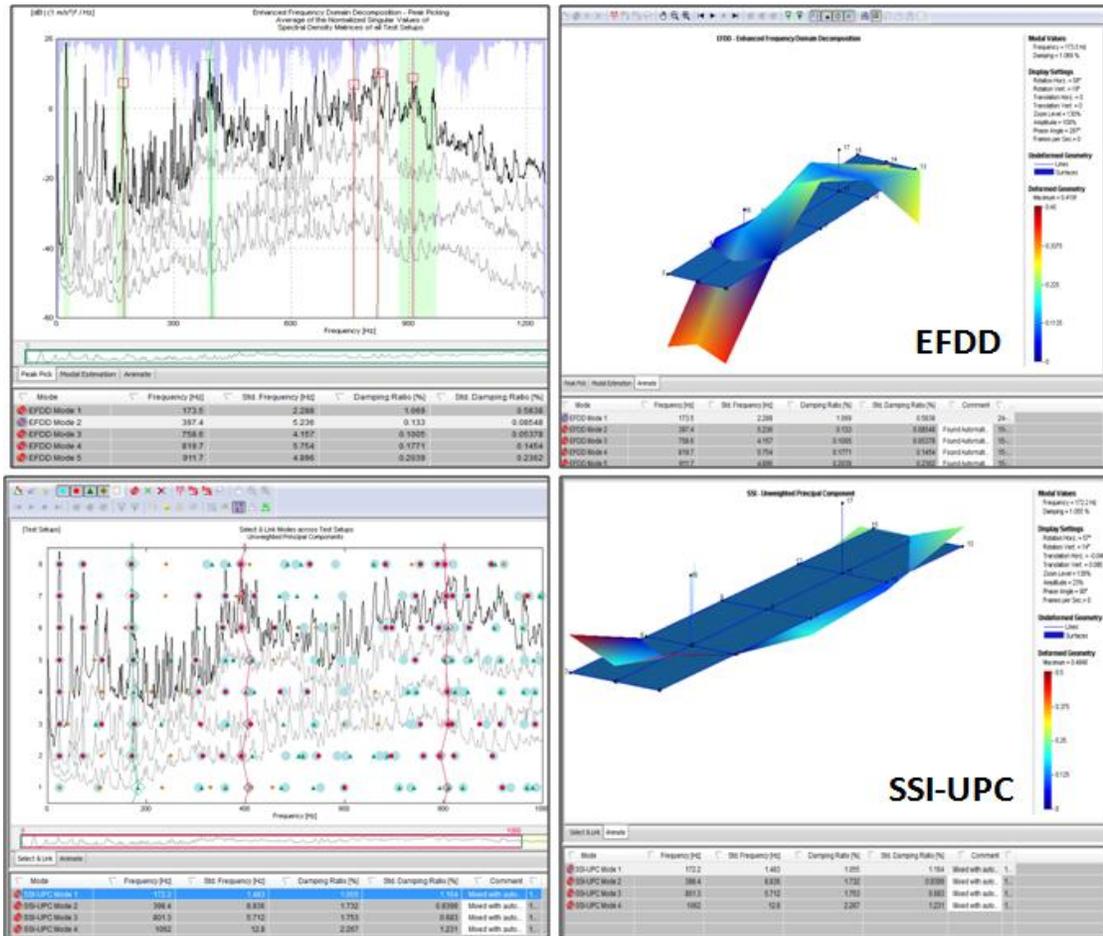


Figura 43. Señal de respuesta procesada por los métodos EFDD y SSI-UPC. [29]



En la Figura 43 se observa las señales procesadas por ARTeMIS con los métodos SSI-UPC y EFDD, para el caso del rotorkit excitado por el motor a una velocidad de 1500 RPM, en esta figura se observa en la parte izquierda los picos de frecuencia identificados en un diagrama de densidad espectral, y al lado derecho, se muestra la forma modal correspondiente a la primer modo vibratorio.

2.5 ESTADÍSTICOS

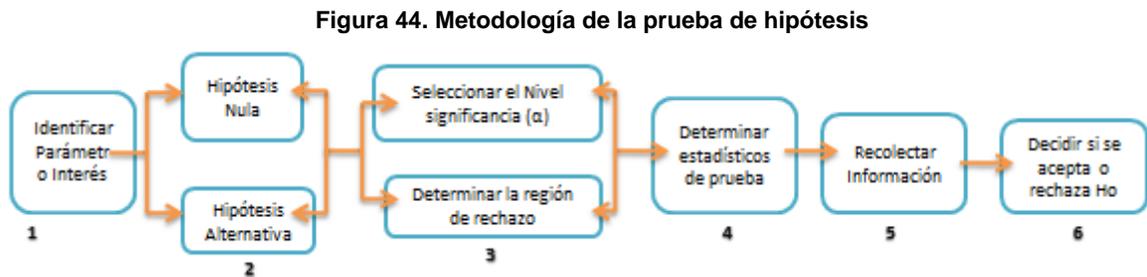
2.5.1 Estadísticos descriptivos

A partir de los resultados recolectados en las distintas configuraciones de los ensayos experimentales (EMA) se crearon los diagramas de caja y bigotes con el empleo del software Excel 2007, con el fin de visualizar la distribución de los datos, a partir de medidas de posición como los son los valores máximos, mínimos y los cuartiles.

Adicionalmente con el software IBP SPSS 19, se realizaron histogramas, como un complemento. (Ver ANEXO H)

2.5.2 Prueba de hipótesis

El método estadístico de prueba de hipótesis fue desarrollado mediante un procedimiento de 6 pasos, como se muestra en la Figura 44. [21] [19]



- El primer paso es identificar el parámetro de interés.
Para este trabajo el parámetro son las *frecuencias naturales* propias de la placa, placa con motor, eje y Rotorkit halladas tanto de forma experimental (EMA) como en operacional (OMA).
- El segundo paso es establecer la “Hipótesis nula” e “Hipótesis alternativa” las cuales son evaluadas en las distintas configuraciones que se emplearon.
 - Hipótesis nula: el valor de las frecuencias naturales obtenidas por medio de EMA y OMA son iguales.

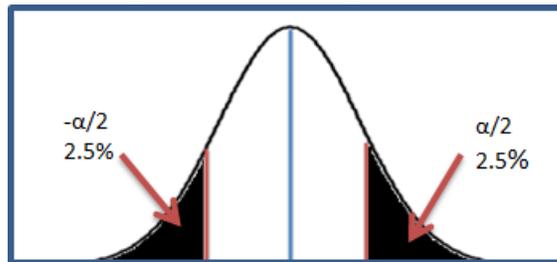
- **$H_0: \mu_{Experimental} (EMA) = X_{Artemis}$.**
- Hipótesis alternativa: existe diferencia significativa entre los resultados en ambos métodos.

$H_1: \mu_{Experimental} (EMA) \neq X_{Artemis}$.

- El tercer paso consta de:
 - Seleccionar el nivel de significancia.

El nivel de significancia (α) controla el error tipo 1 y para este estudio se tomó del 5% (ver Figura 45)

Figura 45. Nivel de significancia



- Determinar la región de rechazo.

A partir del nivel de significancia α , se establece las condiciones para las que se rechaza o no la hipótesis nula **H_0** .

- Cuarto paso es determinar estadísticos de prueba: El estadístico de prueba se haya a partir de los datos muestrales recolectados tanto para EMA como el valor de ARTeMIS (OMA) y se utilizan las siguientes ecuaciones*:

$$Z \text{ (normal)} = \frac{x - \mu}{\sigma / \sqrt{n-1}} \text{ y } t \text{ (student)} = \frac{x - \mu}{s / \sqrt{n}}$$

Dónde:

μ = valor de las frecuencias en OMA ; X = valor de la frecuencia estimada en EMA

σ = desviación estándar ; n = número de datos

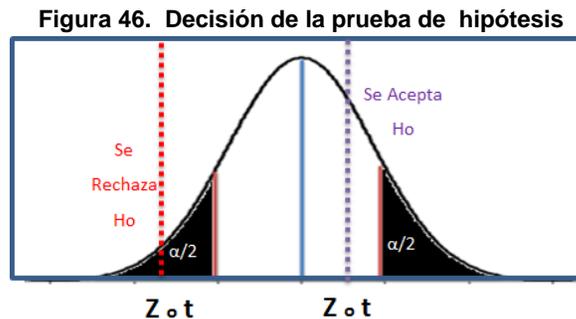
* Ecuaciones tomadas de: la página 171 del capítulo prueba de hipótesis, del libro *Manual de estadística* de Hernández, Emil [19] y de la página 384 del libro *Introducción a la probabilidad y estadística* de W, Mendenhall [20].

- Recolección de la información.

A partir de las frecuencias naturales estimadas de forma experimental (EMA) se calcula la media (μ) para cada configuración evaluada y de igual forma se registran los valores de las frecuencias calculadas (X) por el software ARTeMIS por los métodos SSI-UPC y EFDD.

- Decisión.

Una vez se conoce el estadístico de prueba se evalúa si se rechaza o no la hipótesis nula (**Ho**). Para ello se mira si dicho valor (sea **Z** o **t**) se encuentra por dentro o por fuera de la zona de rechazo (ver Figura 46)



Finalmente para los resultados de las pruebas de hipótesis realizadas en los diferentes casos evaluados, se creó una tabla en la cual se exponen los estadísticos de prueba calculados a partir de los dos métodos del software ARTeMIS con que se realizó el OMA, los valores críticos y por último la decisión sobre la hipótesis nula H_0 . (Ver Tabla 3)

Tabla 3. Ejemplo Prueba de hipótesis entre EMA y OMA

Resultados - Prueba de Hipótesis								
Configuraciones		Variable	Estadístico de prueba		Valor crítico ($\alpha = 5\%$)		H_0	
EMA	OMA	Frecuencia Natural	UPC	EFDD	inferior	superior	UPC	EFDD
Eje impactos	Eje impactos	1	1,504	-2,919	-1,99	1,99		
		2	-3,11	96,058	-1,99	1,99		
		3	3,343	158,65	-1,99	1,99		

3 ANALISIS Y RESULTADOS

3.1 RESULTADOS EMA

A partir de la información que se encuentran en los ANEXOS B, D Y E se realizaron en EXCEL, las tablas *resultados EMA*, que se muestran desde la Tabla 4 hasta la Tabla 8.

Tabla 4. Resultados de análisis modal experimental en placa con motor

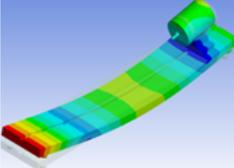
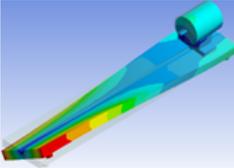
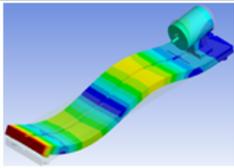
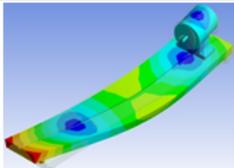
Resultados EMA - PLACA CON MOTOR					
	Forma modal	Tipo de excitación	Frecuencia promedio (Hz)	Desviación Estandar (Hz)	Error (Hz)
1° MODO		Excitación por impacto	180.74	0.58	0.21
1° MODO		Excitación por impacto	419.44	0.88	0.26
3° MODO		Excitación por impacto	753.95	3.29	1.187
4° MODO		Excitación por impacto	1009.32	3.75	1.66

Tabla 5. Resultados de análisis modal experimental en Rotorkit

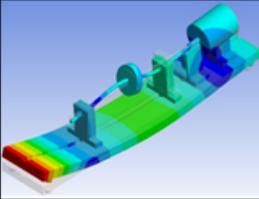
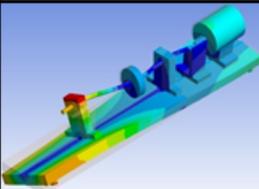
Resultados EMA- ROTORKIT					
	Forma modal	Tipo de excitación	Frecuencia promedio (Hz)	Desviación Estandar (Hz)	Error (Hz)
1° MODO		Barrido sinusoidal	174.73	0	0
		Excitación aleatoria	177.15	4.10	1.68
		Excitación por impacto	178.73	2.43	0.55
2° MODO		Barrido sinusoidal	391.85	0.213	0.11
		Excitación aleatoria	388.45	6.01	2.66
		Excitación por impacto	392.33	3.75	1.06

Tabla 6. Resultados de análisis modal experimental en placa

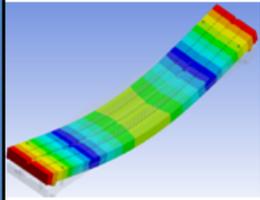
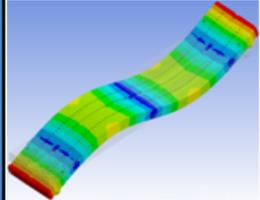
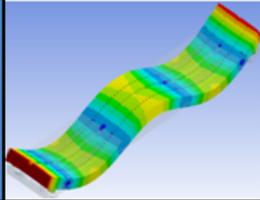
Resultados EMA- PLACA					
	Forma modal	Tipo de excitación	Frecuencia promedio (Hz)	Desviación Estandar (Hz)	Error (Hz)
1° MODO		Barrido sinusoidal	206,63	0,492	0,22
		Excitación aleatoria	205,50	0,53	0,37
		Excitación por impacto	207,29	1,11	0,49
2° MODO		Barrido sinusoidal	570,35	0,38	0,17
		Excitación aleatoria	569,10	2,51	1,77
		Excitación por impacto	570,96	0,89	0,61
3° MODO		Barrido sinusoidal	1109,64	1,034	0,47
		Excitación aleatoria	No fue identificada		
		Excitación por impacto	1113,30	0,84	0,38

Tabla 7. Resultados de análisis modal experimental en eje para el montaje 1

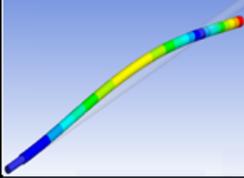
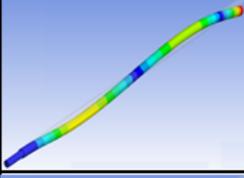
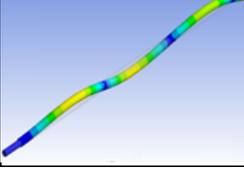
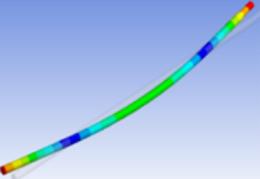
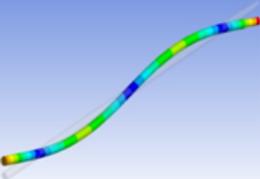
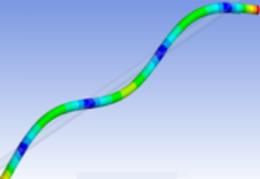
Resultados EMA - EJE (montaje 1)					
	Forma modal	Tipo de excitación	Frecuencia promedio (Hz)	Desviación Estandar (Hz)	Error (Hz)
1° MODO		Barrido sinusoidal	181.08	5.06	2.65
		Excitación aleatoria	180.58	3.45	1.46
2° MODO		Barrido sinusoidal	517.61	9.83	4.6
		Excitación aleatoria	519.08	10.36	4.38
3° MODO		Barrido sinusoidal	1038.49	12.85	6
		Excitación aleatoria	No fue identificada		

Tabla 8. Resultados de análisis modal experimental en eje para montaje 2

Resultados EMA - EJE (montaje 2)					
	Forma modal	Tipo de excitación	Frecuencia promedio (Hz)	Desviación Estandar (Hz)	Error (Hz)
1° MODO		Excitación por impacto	201,01	3,03	0,66
2° MODO		Excitación por impacto	554,95	7,91	1,73
3° MODO		Excitación por impacto	1077,7	12,44	2,75

3.2 ANÁLISIS EMA

Antes de proceder con los análisis de los resultados EMA, se aclara que en algunos casos, el número de pruebas fueron menores a 30 datos, aspecto por el cual el estadístico de prueba se calcula de acuerdo a una distribución t-student, para un determinado nivel de confianza. Este parámetro resulta mayor al que se calcula partir de una distribución normal Z. Todo lo anterior se menciona para tenerlo en cuenta en los análisis de los errores de muestras con distintos número de datos.

Con relación a los resultados obtenidos en la fase del análisis modal experimental (EMA), que se muestran en la subsección anterior, se puede realizar análisis orientados a observar las desviaciones que presentaron cada una de las frecuencias naturales medidas, así como los errores asociados a las mismas.

Para el Rotorkit (ver Tabla 4), en el ensayo modal con excitación por barrido sinusoidal, se observa una desviación estándar máxima de 0,213 Hz, presente en la segundo modo vibratorio, y la desviación estándar mínima de 0 Hz, para el primero modo. Además, la mínima distancia en Hz entre los picos de frecuencia corresponde a 217,12 Hz, entre el primer y segundo modo.

Para el ensayo modal con excitación aleatoria en el Rotorkit (ver Tabla 4), se observa una desviación de 4,10 Hz para el primer modo y 6,1 Hz para el segundo, junto con un error máximo 2,66 Hz. La distancia máxima entre los picos de frecuencia para este caso, es de 211,3 Hz. Esto hace que este sistema la mínima desviación típica se presente cuando el Rotorkit se excita de forma sinusoidal por medio del barrido y la máxima se presente cuando el sistema es excitado de forma aleatoria.

Para la placa con motor (ver Tabla 4), en el ensayo modal de impacto, se observa que la desviación estándar máxima es igual a 3,75 Hz, presente en el cuarto modo vibratorio, junto con un error máximo de 1,66 Hz. Otro de los aspectos que se observan es la mínima distancia en Hz entre los picos de frecuencia con un valor de 238,7 Hz, entre el primer y segundo modo.

Para la placa, en el ensayo modal, se observa que la desviación estándar máxima es de 2,51 Hz, presente a la segunda frecuencia natural cuando la placa es excitada de forma aleatoria, con ello el error asociado es de 1,77 Hz. La mínima desviación estándar es de 0,49 Hz para el primero modo, cuando la placa es excitada por medio de una señal sinusoidal, con un error asociado de 0,22 Hz.

Para el análisis modal experimental en el eje en el primer montaje, la desviación estándar máxima y mínima, son 12,85 Hz y 3,45Hz respectivamente, las cuales se presentaron en los ensayos modales con excitación por medio de un barrido y de manera aleatoria. El error máximo se presentó en los ensayos modales con barrido sinusoidal, con un valor de 6 Hz, para el tercer modo vibratorio.

La distancias entre picos de frecuencia, correspondiente a las frecuencias naturales identificadas, para ensayo modal en este mismo sistema es 336,53 Hz, correspondiente a un ensayo modal con excitación de barrido, la cual está dada para los dos primeros modos.

En el segundo montaje para el eje, en que se emplea una excitación de tipo de impacto, la desviación máxima presente en las frecuencias estimadas es de 12,44 Hz en la tercera frecuencia natural, con un error asociado de 2,75 Hz. Para este caso, la mínima distancia entre las frecuencias corresponde a la presente entre los dos primeros modos con un valor de 353,94 Hz.

Por lo que se describió anteriormente para cada sistema bajo los distintas configuraciones, clasificadas de acuerdo al tipo de excitación que se aplico para realizar los análisis modales, se logró observar la desviación típica de las frecuencias naturales medidas, y con ello establecer cuáles de ellas presentaban mayores dispersiones. Con base a esta información, se puede observar que error máximo que se presentó fue de 6 Hz para en el eje bajo el primer montaje cuando es excitado por medio de un barrido, y un error mínimo de 0 Hz, presente en la Rotorkit cuando es excitado por medio de un ensayo modal con barrido sinusoidal; de igual manera, se presenta en el mismo sistema con el mismo tipo de excitación un error de 0,11 Hz para el segundo modo, respectivamente.

3.3 RESULTADOS OMA

A partir de los datos que se encuentran en ANEXO G se realizaron en Excel, las tablas *RESULTADOS EMA*, que se muestran desde la Tabla 9 hasta la Tabla 13.

Tabla 9. Resultado análisis modal operacional en placa con motor. [29]

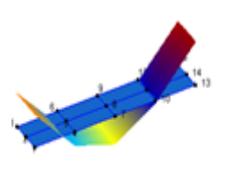
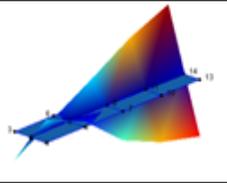
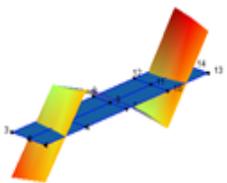
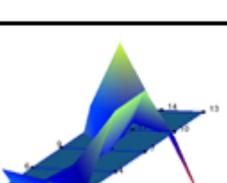
Resultados OMA- PLACA CON MOTOR				
	Forma modal	Fuente de excitación	método de identificación	
			SSI-UPC	EFDD
			Frecuencia promedio (Hz)	Frecuencia promedio (Hz)
1° MODO		Motor electrico de 0.1 HP a 1500 RPM	175,3	172,2
2° MODO		Motor electrico de 0.1 HP a 1500 RPM	415	398,7
3° MODO		Motor electrico de 0.1 HP a 1500 RPM	778,2	598,2
4° MODO		Motor electrico de 0.1 HP a 1500 RPM	971,6	976,4

Tabla 10. Resultados de análisis modal operacional en un Rotorkit. [29]

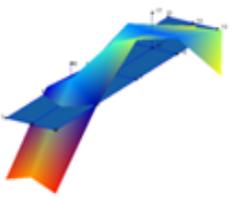
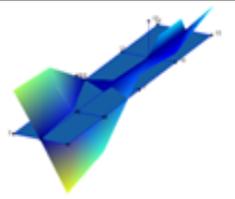
Resultados OMA- ROTORKIT				
	Forma modal	Fuente de excitación	método de identificación	
			SSI-UPC	EFDD
			Frecuencia promedio (Hz)	Frecuencia promedio (Hz)
1° MODO		Motor electrico de 0.1 HP a 1500 RPM	172,2	173,5
2° MODO		Motor electrico de 0.1 HP a 1500 RPM	384,4	397,4

Tabla 11. Resultados de análisis modal operacional en una placa. [29]

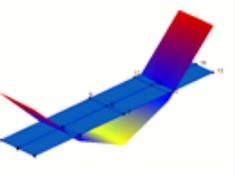
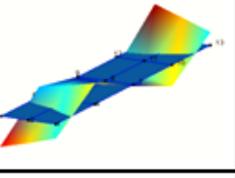
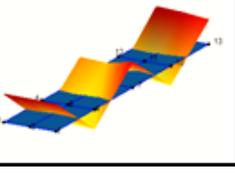
Resultados OMA- PLACA				
	Forma modal	Fuente de excitación	método de identificación	
			SSI-UPC	EFDD
			Frecuencia promedio (Hz)	Frecuencia promedio (Hz)
1° MODO		Impactos	206,6	206,6
		Señales armónicas (207 Hz, 414 Hz, 621 Hz)	195,9	201,9
2° MODO		Impactos	569,4	569,2
		Señales armónicas (207 Hz, 414 Hz, 621 Hz)	562,2	565,3
3° MODO		Impactos	1112	1111
		Señales armónicas (207 Hz, 414 Hz, 621 Hz)	1042	1029

Tabla 12. Resultados de análisis modal operacional en eje para el montaje 1. [29]

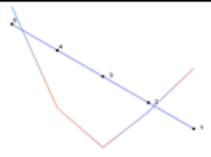
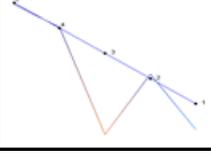
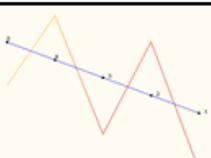
	Resultados OMA- EJE (montaje 1)			
	Forma modal	Fuente de excitación	método de identificación	
			SSI-UPC	EFDD
			Frecuencia promedio (Hz)	Frecuencia promedio (Hz)
1° MODO		Señal sinusoidal a 50 Hz	156,3	160,6
2° MODO		Señal sinusoidal a 50 Hz	490,6	478,6
3° MODO		Señal sinusoidal a 50 Hz	960,3	953,9

Tabla 13. Resultados de un análisis modal operacional en un eje para el montaje 2. [29]

	Resultados OMA- EJE (montaje 2)			
	Forma modal	Fuente de excitación	método de identificación	
			SSI-UPC	EFDD
			Frecuencia promedio (Hz)	Frecuencia promedio (Hz)
1° MODO		Excitación por impactos	200,5	202
2° MODO		Excitación por impactos	557,7	470
3° MODO		Excitación por impactos	1073	857

3.4 ANÁLISIS OMA

A partir de la información contenida en las tablas de resultados OMA, mostrados en la sub-sección anterior, se pueden estimar las diferencias entre las frecuencias naturales que son calculadas por el software ARTeMIS Extractor PRO, por medio de sus métodos SSI-UPC y EFDD; de esta forma observar en cuales sistemas y configuraciones existen grandes diferencias entre ellos.

Para la placa con motor (ver Tabla 9), la máxima diferencia es de 180 Hz en el tercer modo, siendo el valor de la frecuencia EFDD algo disperso (155,75Hz) con relación a la diferencia entre el valor SSI-UPC y la frecuencia natural medida de forma experimental (24,25Hz).

Para el Rotorkit (ver Tabla 10), el cual es excitado por un motor eléctrico a 1500 RPM, la máxima diferencia entre los métodos fueron de 13 Hz, al igual que la placa bajo excitación de una señal sinusoidal de 207Hz con sus tres primeros armónicos.

Para el eje en el primer montaje (ver Tabla 12), cuando es excitado por medio de una señal sinusoidal a 50 Hz, se presenta una máxima diferencia de 12Hz correspondiente al 2 modo. Para el eje en segundo montaje, cuando se excita el sistema por medio de una serie de impactos, se presentan diferencias de 87,7 Hz, en el segundo modo, y 216 Hz, para el tercer modo. Con relación a estas últimas diferencias se observa que se debe nuevamente por los valores de las frecuencias estimadas por los métodos EFDD, las cuales presentan una dispersión con relación a la experimental de 84,95 Hz y 220,7Hz, para el segundo y tercer modo respectivamente.

Con base a la información mencionada acerca de cada uno de las configuraciones de los análisis modales operacionales en los sistemas placa, placa con motor, eje y Rotorkit, se puede observar los casos en que se presentaron menores diferencias entre la estimación de las frecuencias naturales entre los métodos. De manera general, las mínimas diferencias se presentaron en

la placa bajo excitación de una serie de impactos, donde la diferencia no excedió 1 Hz. De igual modo, para el caso del eje con excitación con una señal a 50Hz, se observa que la máxima diferencia es 12 Hz, menor a las presentes en los sistemas Rotorkit, placa con motor, eje bajo excitación con impactos y placa bajo excitación con señal armónica a 207 Hz.

Se aclara que para el caso, en que existe la excitación por parte del motor eléctrico empleado, el procesamiento automático realizado por ARTeMIS Extractor PRO, no resulta efectivo en identificar los modos; por ende, se requiere que el usuario ajuste en un post-análisis las respuestas, basándose en un conocimiento previo de dichos parámetros, los cuales pueden ser conocidos de forma experimental o por medio de un modelo analítico descrito.

3.5 ESTADÍSTICOS

3.5.1 Estadísticos descriptivos.

A partir de los datos obtenidos en el ANEXO E, se crearon los diagramas de caja y bigotes que se muestran desde la Figura 47 hasta la Figura 56, y de dichos diagramas se hicieron los siguientes análisis:

- Ensayo del eje excitación por impactos (ver Figura 47):
1era Frecuencia natural, los datos están entre 195hz a 205hz dando un intervalo de distribución de los datos de 10 hz. El **RIC** (Q3-Q1) igual a 4hz, da una franja donde están el 50% de los datos. La distribución esta sesgada a la izquierda, además la mediana esta a 1,24 hz de la media.

2da frecuencia, el diagrama muestra que es regularmente simétrico, los datos están distribuidos entre 542 hz a 567 hz, dando un intervalo de 25 hz de dispersión. La mediana es de 555,5 hz y está a 0,55hz de la media que es 554,95hz.

3era frecuencia, los datos se encuentran entre los 1055 hz a los 1092 hz, dando unos 37 hz entre que los datos se distribuyen. El diagrama de caja y bigotes está sesgado a la izquierda notoriamente, y el bigote izquierdo es más grande que el derecho, por ello el primer 25% de los datos es más disperso.

- En los ensayos EMA para el eje, hechos por barrido sinusoidal y aleatorio, el montaje es el mismo y se puede hacer comparaciones del diagrama de caja y bigotes de los dos (ver Figura 48 y Figura 49):

Para la primera 1era frecuencia natural, en el barrido sinusoidal los datos se encuentran distribuidos entre los 173,25 hz a los 187,14 hz, y para el aleatorio está entre los 174 hz a los 187 hz, por ello los intervalos en que distribuyen los datos son muy parecidas, de 13,89 hz para el sinusoidal y de 13 hz para el aleatorio. El barrido tiene un RIC mayor que el de aleatorio, 9,3 hz para el primero y 2,25 hz para el segundo, ello infiere que el 50% de los datos del barrido están más dispersos; sin embargo, se observan que los bigotes del aleatorio son más grandes que el de barrido, por ello pueden existir posibles valores atípicos en el aleatorio que alargan líneas de máximo y mínimo.

En la 2da frecuencia, para el barrido sinusoidal los datos están entre los 531,5 hz a los 505,7 hz y para el aleatorio se encuentran entre 534 hz a 503 hz, por ellos sus intervalos son distintos, de 25,8 hz para el primero y 31 hz para el segundo. En ambos casos el diagrama está sesgado a la izquierda.

3era frecuencia solo se calculó para el barrido sinusoidal y en ella la caja como tal es regularmente simétrica con un RIC de 23,9 hz (1046hz-1022,7zh). El bigote izquierdo está muy cerca con el primer cuartil, los separan 0,4hz y en cambio el derecho es más grande ya que hay valores más lejanos de la media.

- En los ensayos EMA para la placa, impactos, barrido sinusoidal y aleatorio el montaje sobre el que se trabajo es el mismo, por ello se puede hacer comparaciones entre los diagramas de caja y bigotes de los tres (ver Figura 50, Figura 51y Figura 52):

Para la 1era frecuencia natural la excitación por impactos los datos están entre 206 hz a 209,5 hz (intervalo de 3,5 hz), en el barrido sinusoidal están entre 206 hz a 207,95 hz (intervalo de 1,95 hz) y en el aleatorio los datos están entre 205 hz a 206 hz (intervalo 1hz), lo anterior muestra que existe poca dispersión para los ensayos hechos sobre la placa, por ello en el aleatorio no existen bigotes, en el barrido solo existe el bigote derecho igual que para el de excitación por impactos.

En la 2da frecuencia los datos están distribuidos así, para el ensayo de impactos desde 570 hz hasta 572,5 hz, una franja de 2,5 hz, para el ensayo sinusoidal de 569,71 hz hasta 570,7 hz, una franja de 0,99 hz y para el ensayo aleatorio, desde 564 hz hasta 572 hz, una franja de 8hz, nuevamente la dispersión es baja para impactos y el sinusoidal, pero en el aleatorio no es así. En el ensayo aleatorio no existen bigotes y la caja incluye todos los datos, además se nota que esta sesgada a la izquierda.

En la 3era frecuencia para el caso del ensayo por impactos los datos están entre 1111 hz a 1114 hz y en el barrido están entre 1009 hz a 1112,4 hz, es decir los intervalos en que se distribuyen los datos son 3 hz para la primera y 3,4 hz, siendo muy semejantes y teniendo una dispersión baja. En lo que refiere al diagrama para impactos solo existe el bigote izquierdo y su tamaño es 2 hz mientras que el de la caja es de 1 hz. En el caso del ensayo por barrido ocurre un caso muy parecido pero el único que existe es el de la derecha, además que el valor mínimo, el cuartil 1 y 2 tienen el mismo valor.

- Ensayo EMA en la placa con motor (ver Figura 53):

En la 1era frecuencia natural los datos están distribuidos entre 180 hz a 182 hz, dando un intervalo de 2 hz para la distribución de los datos, la cual es bastante baja. La mediana y la media están separadas por 0,26 hz, sus valores son 180,5 hz la primera y a 180,76 la segunda.

En la 2da frecuencia natural los datos están distribuidos entre 417 hz a 422,5 hz, dando un intervalo de 5,5 hz, siendo la dispersión poca también. La mediana y la media están separadas por 0,44 hz, sus valores son 419 hz para la primera y 419,44 hz para la segunda. Se nota que existe una distribución sesgada a la derecha.

La 3era frecuencia tiene un intervalo de 14hz entre el valor máximo y el mínimo, en la caja el cuartil 2 y 3 tiene el mismo valor, ello puede ser porque existen valores atípicos, a la derecha, que sesgan el promedio.

La 4ta frecuencia tiene una distribución regularmente simétrica, además que la diferencia entre el valor máximo y mínimo es de 15 hz, siendo mayor que las anteriores.

- En los ensayos EMA en el Rotorkit por excitación por impactos, barrido sinusoidal y aleatorio el montaje sobre el que se trabajo es el mismo, por ello se puede hacer comparaciones entre los diagramas de caja y bigotes de los tres (ver Figura 54,

- Figura 55 y Figura 56):

En la 1era frecuencia natural, la diferencia entre el valor mayor y el menor, es para ensayo de impactos es de 8,5 hz, ensayo aleatorio de 13 hz. El ensayo por barrido sinusoidal es un caso particular ya que no hubo dispersión en los datos con un valor constante de 174,73hz. La grafica de caja y bigotes del ensayo aleatorio esta segado a la izquierda mientras que en ensayo por impactos esta ligeramente sesgada a la derecha.

En la 2da frecuencia natural, los rangos en que se distribuyen los datos es de 13,5 hz para ensayo por impactos, 21hz para el caso del aleatorio y de 1 hz para barrido. En el caso específico de excitación por impactos, el diagrama esta regularmente simétrico, para el caso de aleatorio que tiene la mayor dispersión se nota que el bigote izquierdo es bastante grande es decir la dispersión del primer 25% de los datos es alta. Finalmente para el ensayo del barrido sinusoidal el hecho que tenga sus datos entre los 391 hz a los 392 hz demuestra su particular baja dispersión que igualmente ocurrió pero la primera frecuencia natura.

Con relación a los histogramas de las distribuciones de las muestras referirse al ANEXO H.

Figura 47. Caja y bigotes para EMA- eje excitación por impactos

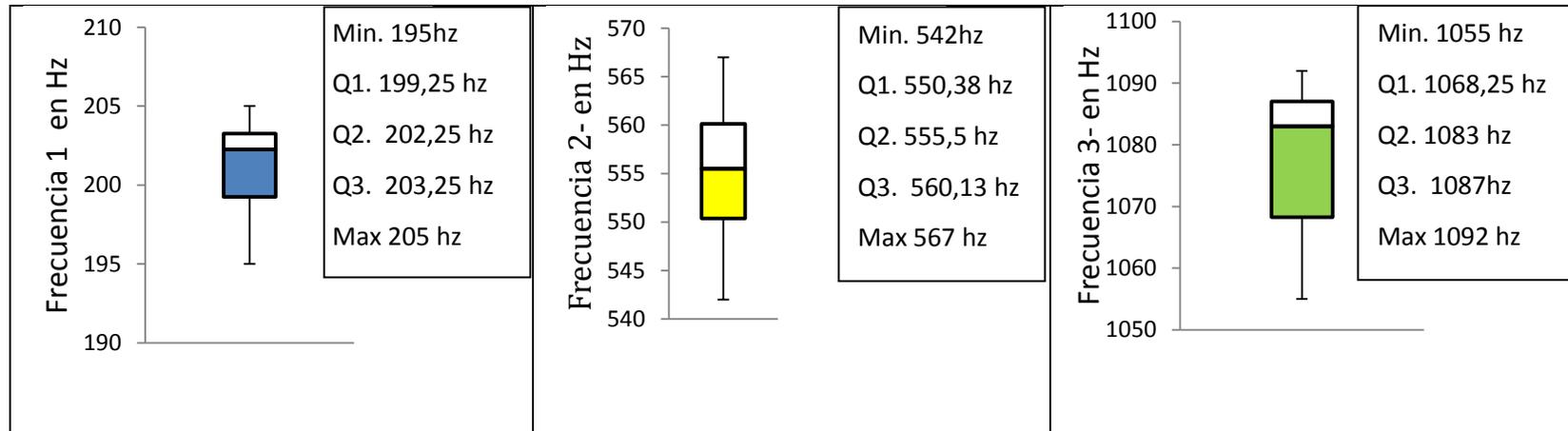


Figura 48. Caja y bigotes para EMA- eje excitación por barrido sinusoidal

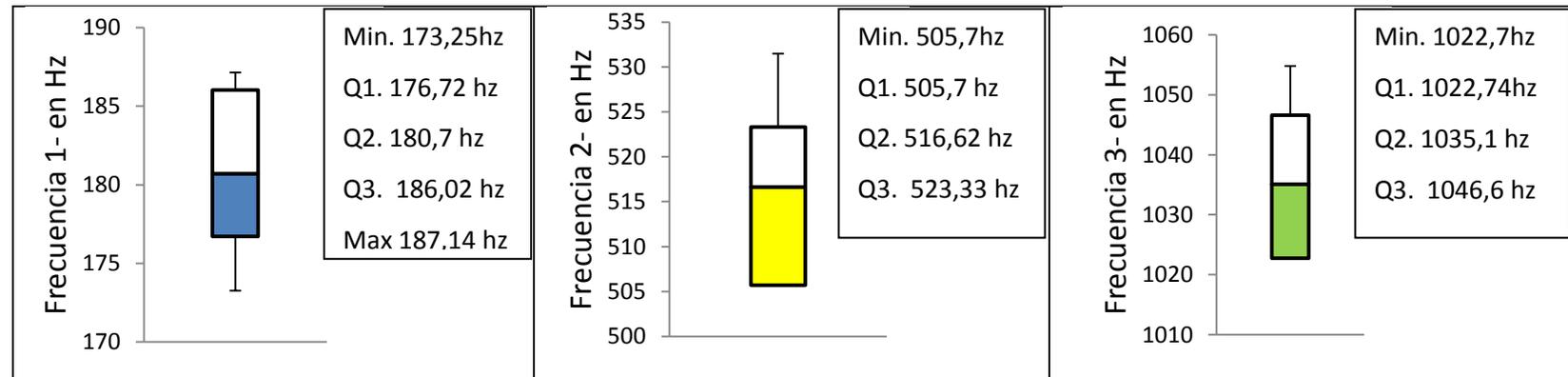


Figura 49. Caja y bigotes para EMA- eje excitación aleatoria

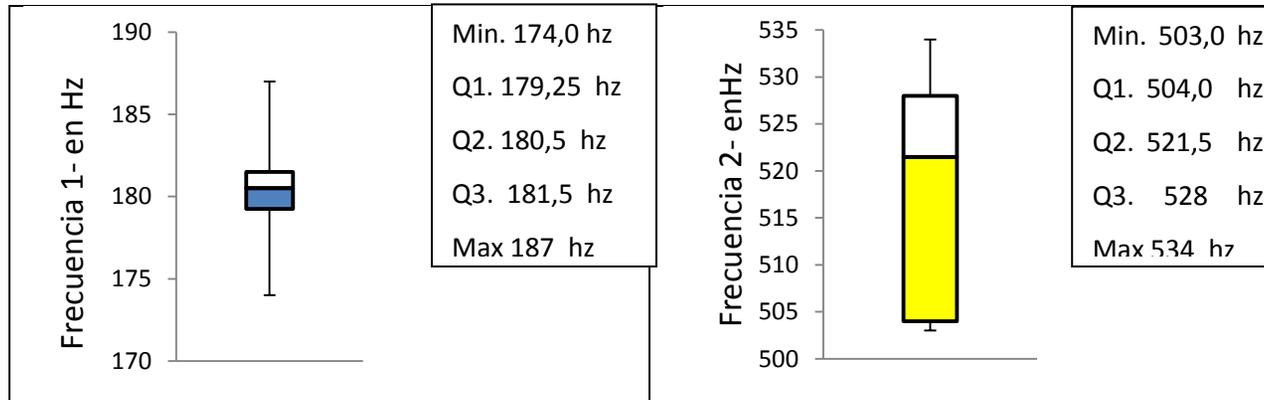


Figura 50. Caja y bigotes para EMA- Placa excitación por impactos

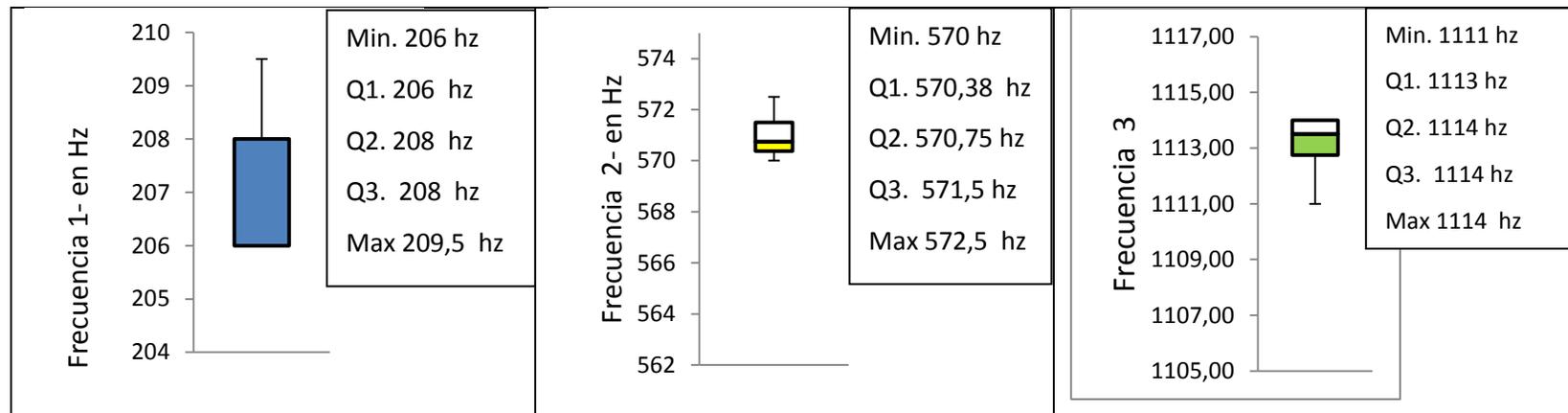


Figura 51. Caja y bigotes para EMA- Placa excitación por barrido sinusoidal

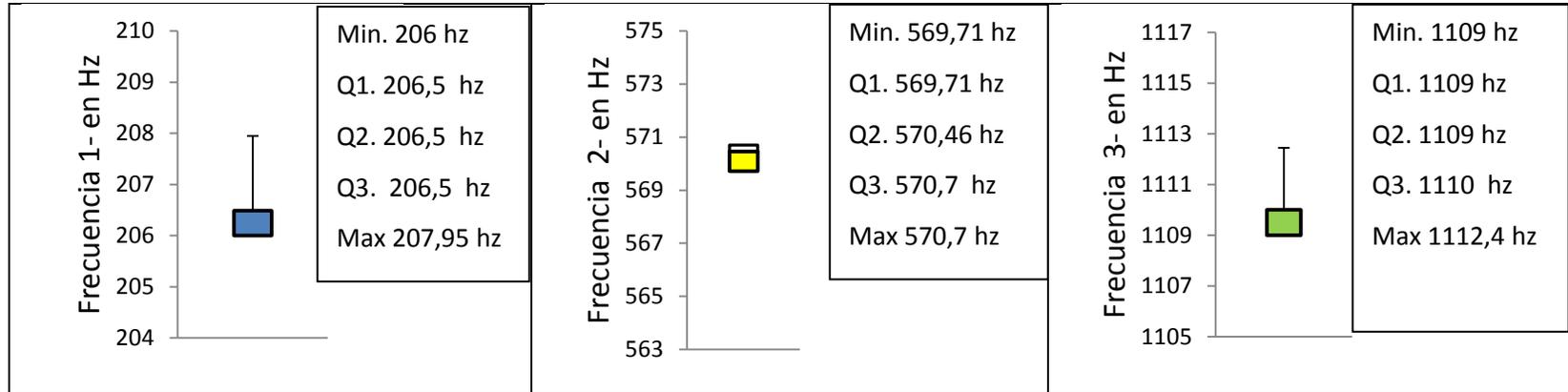


Figura 52. Caja y bigotes para EMA- Placa excitación aleatoria.

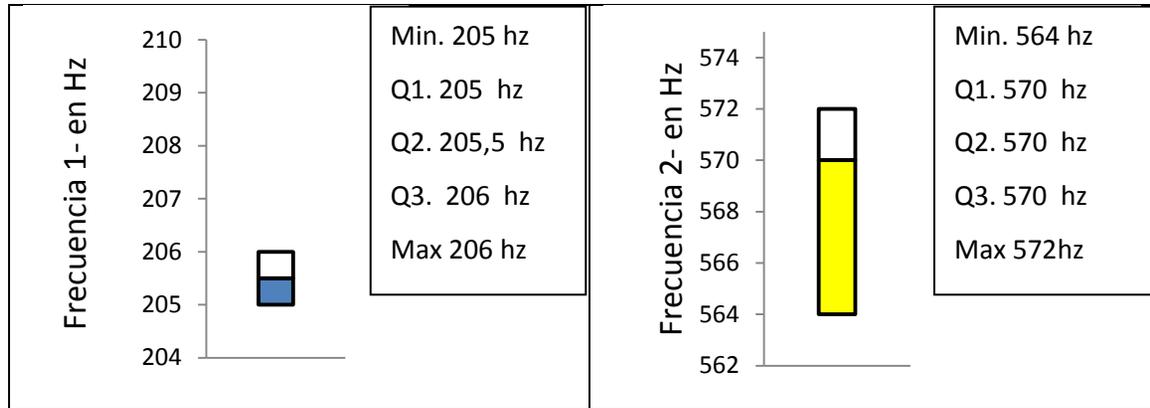


Figura 53. Caja y bigotes para EMA- Placa con Motor excitación por impactos

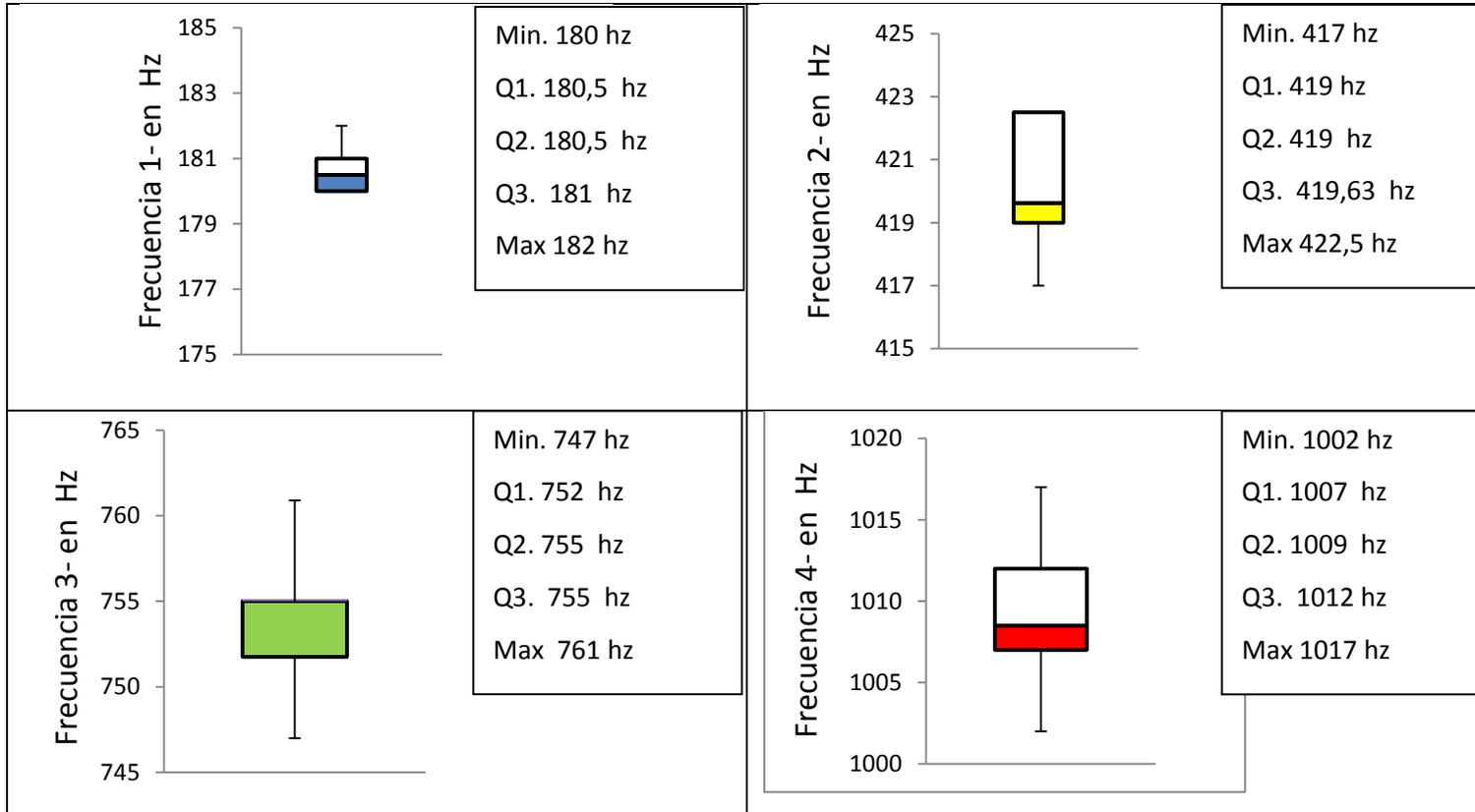


Figura 54. Caja y bigotes para EMA- Rotorkit excitación por impactos

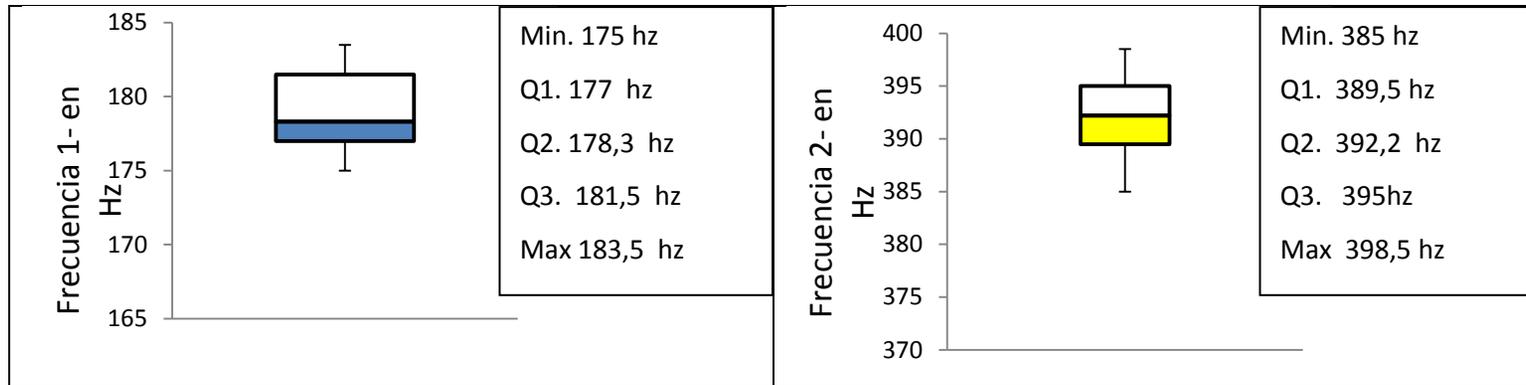


Figura 55. Caja y bigotes para EMA- Rotorkit excitación aleatoria

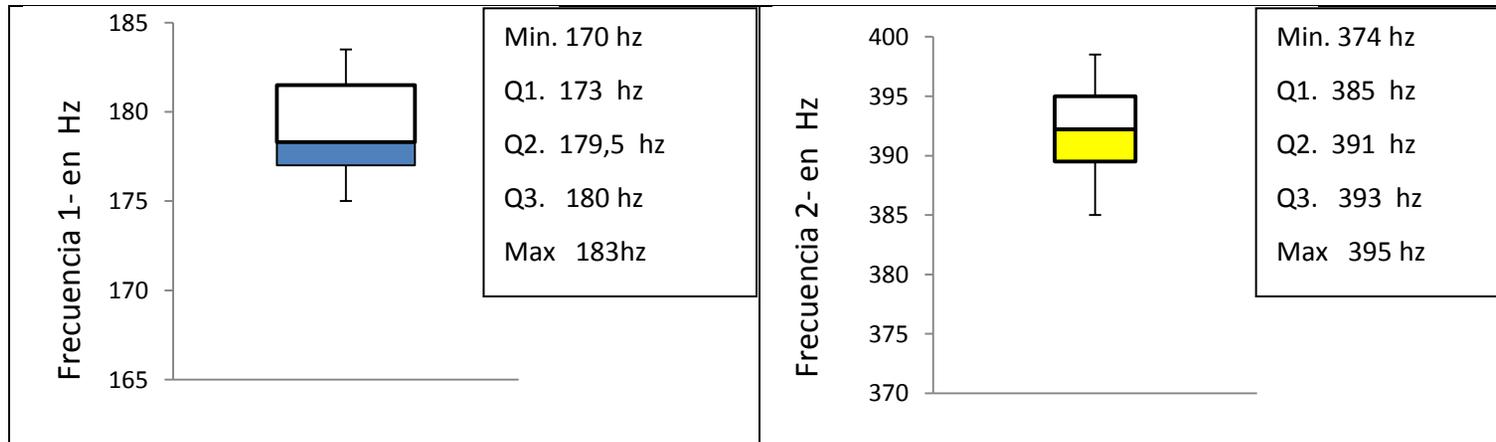
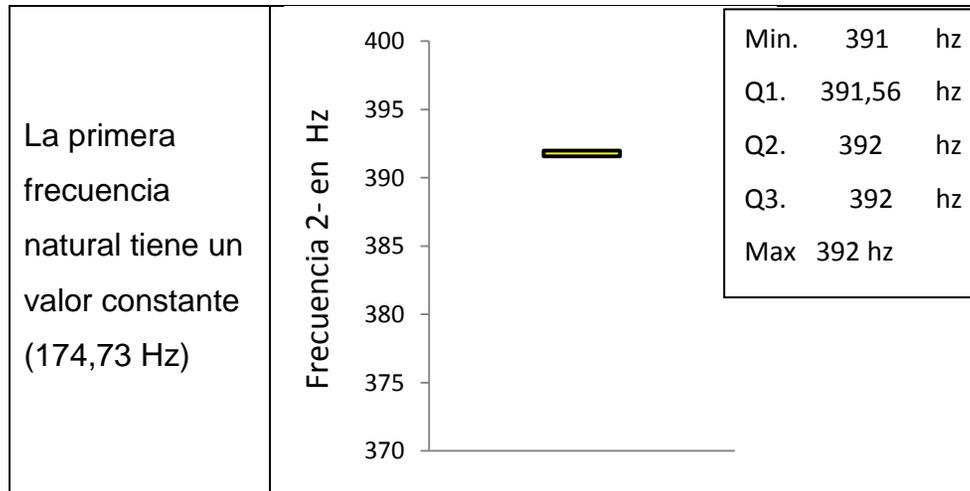


Figura 56. Caja y bigotes para EMA- Rotorkit excitación por barrido sinusoidal



3.5.2 Prueba de hipótesis

Tabla 14. Prueba de hipótesis entre EMA y OMA

Resultados - Prueba de Hipótesis								
Configuraciones		Variable	Estadístico de prueba		Valor crítico ($\alpha = 5\%$)		Ho	
EMA	OMA	Frecuencia Natural	UPC	EFDD	inferior	superior	UPC	EFDD
Eje impactos	Eje impactos	1	1,504	-2,919	-1,99	1,99		
		2	-3,110	96,058	-1,99	1,99		
		3	3,343	158,65	-1,99	1,99		
Eje Barrido sinusoidal	Eje 50 hz	1	21,901	18,101	-2,086	2,086		
		2	12,284	17,743	-2,086	2,086		
		3	27,796	30,071	-2,086	2,086		
Eje Excitación aleatoria	Eje 50 hz	1	34,477	34,477	-2,064	2,064		
		2	31,871	31,871	-2,064	2,064		
		3			-2,064	2,064		
Placa impactos	Placa impactos	1	2,916	2,916	-2,074	2,074		
		2	6,298	7,086	-2,179	2,179		
		3	7,259	12,843	-2,074	2,074		
	Placa armónicos 207 n	1	48,130	48,130	-2,074	2,074		
		2	22,832	22,832	-2,179	2,179		
		3	398,13	398,13	-2,074	2,074		
Placa barrido sinusoidal	Placa impactos	1	0,2806	0,2806	-2,08	2,08		
		2	11,456	13,868	-2,08	2,08		
		3	-10,46	-6,027	-2,08	2,08		
	Placa armónicos 207 n	1	100,35	44,236	-2,08	2,08		
		2	62,106	62,106	-2,08	2,08		
		3	299,77	357,39	-2,08	2,08		
Placa con excitación aleatoria	Placa impactos	1	-6,563	-6,563	-2,228	2,228		
		2	-0,378	-0,126	-2,228	2,228		
		3			-2,228	2,228		
	Placa armónicos 207 n	1	57,279	21,48	-2,228	2,228		
		2	4,9135	4,7875	-2,228	2,228		
		3			-2,228	2,228		

Resultados - Prueba de Hipótesis								
Configuraciones		Variable	Estadístico de prueba		Valor critico		Ho	
EMA	OMA	Frecuencia Natural	UPC	EFDD	inferior	superior	UPC	EFDD
Placa con motor impactos	Placa con motor 1500 RPM	1	53,252	83,487	-2,038	2,038		
		2	34,557	158,354	-2,029	2,029		
		3	-41,696	267,798	-2,038	2,038		
		4	47,179	43,677	-2,074	2,074		
Rotorkit impactos	Rotorkit 1500 RPM	1	23,427	18,763	-1,664	1,664		
		2	14,595	-9,422	-1,679	1,679		
Rotorkit barrido sinusoidal	Rotorkit 1500 RPM	1	NO aplica la prueba de hipótesis (desviación es nula)					
		2	150,513	-112,13	-2,101	2,101		
Rotorkit excitación aleatoria	Rotorkit 1500 RPM	1	6,164	4,545	-2,056	2,056		
		2	2,932	-7,231	-2,074	2,074		

Fuente: generada a partir de la información contenida en las tablas resultados EMA, las tablas de resultados OMA y la teoría expuesta en la sección 2.5.2 de la metodología.



Hipótesis Nula aceptada

No aplica Prueba de hipótesis, por Frecuencias NO identificadas en EMA

Solo en 5 de los 72 casos en que se realizó la prueba de hipótesis se acepta la hipótesis nula; afirmando que en la mayoría de los casos, a un nivel de significancia del 5% existen diferencias significativas entre las frecuencias naturales estimadas de forma experimental contra el valor de frecuencia que es calculado por ARTeMIS de forma operacional.

Los casos en que la prueba de hipótesis aceptó la hipótesis nula planteada, son las siguientes:

-1era frecuencia para Eje impactos (EMA) - eje impactos (OMA-UPC)

EMA: 80 datos; 201,013 Hz frecuencia natural; 3,0325 Hz desviación.

OMA: 200,5 Hz frecuencia natural.

-1era frecuencia Placa barrido sinusoidal (EMA) - placa impactos (OMA-UPC)

EMA: 21 datos; 206,63 Hz frecuencia natural; 0,492 Hz desviación.

OMA: 206,6 Hz frecuencia natural.

-1era frecuencia Placa barrido sinusoidal (EMA) - placa impactos (OMA-EFDD)

EMA: 21 datos; 206,63 Hz frecuencia natural; 0,492 Hz desviación.

OMA: 206,6 Hz frecuencia natural

-2da frecuencia Placa aleatorio (EMA) - placa impactos (OMA-UPC)

EMA: 10 datos; 569,1 Hz frecuencia natural; 2,52 Hz desviación.

OMA: 569,4 Hz frecuencia natural

-2da frecuencia Placa aleatorio (EMA) - placa impactos (OMA-EFDD)

EMA: 10 datos; 569,1 Hz frecuencia natural; 2,52 Hz desviación.

OMA: 569,2 Hz frecuencia natural

3.5.3 Estadísticos complementarios

Dada la situación que las pruebas de hipótesis rechazan en su mayoría las hipótesis nulas planteadas, se realiza la Tabla 15 como un estadístico complementario, donde se pueda observar claramente los valores de la frecuencia en Hz, que limitan el intervalo de confianza definido para EMA, al igual que los valores de frecuencia dadas por los métodos del software ARTeMIS y finalmente y finalmente el valor Delta.

El valor **DELTA**, representa los Hz que hacen falta a los valores de cada una de las frecuencias naturales estimadas por los métodos EFDD y UPC, para entrar dentro del intervalo de confianza definido para las frecuencias naturales de cada uno de los modos vibratorios estimados en EMA.

Tabla 15. Valor Delta (Hz) en las distintas configuraciones para EMA y OMA

Configuraciones		Intervalo de confianza EMA		Frecuencia natural OMA		DELTA [Hz]		
		Vci [Hz]	Vcs [Hz]	UPC [Hz]	EFDD [Hz]	UPC	EFDD	
EMA	OMA							
Eje impactos	Eje impactos	200,35	201,67	200,5	202	-0,15	0,33	
		553,22	556,68	557,7	470	1,02	83,22	
		1078,87	1080,33	1073	857	5,87	221,87	
Eje Barrido sinusoidal	Eje 50 hz	178,45	183,45	160,6	156,3	17,85	22,15	
		513,01	522,2	490,6	478,6	22,41	34,41	
		1032,5	1044,51	960,3	953,6	72,2	78,9	
Eje excitación aleatoria	Eje 50 hz	179,13	182,04	160,6	156,3	18,53	22,83	
		514,45	523,45	490,6	478,6	23,85	35,85	
		NO fue identificada la frecuencia						
Placa impactos	Placa impactos	206,8	207,78	206,6	206,6	0,2	0,2	
		570,44	571,66	569,4	569,2	1,04	1,24	
		1112,92	1113,67	1112	1111	0,92	1,92	
	Placa armonicos 207 n	206,8	207,78	195,9	201,9	10,9	4,9	
		570,44	571,66	565,2	565,3	5,24	5,14	
		1112,92	1113,67	1042	1029	70,92	83,92	
Placa barrido sinusoidal	Placa impactos	206,41	206,85	206,6	206,6	-0,19	-0,19	
		570,18	570,52	569,4	569,2	0,78	0,98	
		1109,17	1110,1	1112	1111	1,9	0,9	
	Placa armonicos 207 n	206,41	206,85	195,9	201,9	10,51	4,51	
		570,18	570,52	565,2	565,3	4,98	4,88	
		1109,17	1110,1	1042	1029	67,17	80,17	
placa excitación aleatoria	Placa impactos	205,13	205,87	206,6	206,6	0,73	0,73	
		567,32	570,87	569,4	569,2	-2,08	-1,88	
		NO fue identificada la frecuencia						
	Placa armonicos 207 n	205,13	205,87	195,9	201,9	9,23	3,23	
		567,32	570,87	565,2	565,3	2,12	2,02	
		NO fue identificada la frecuencia						

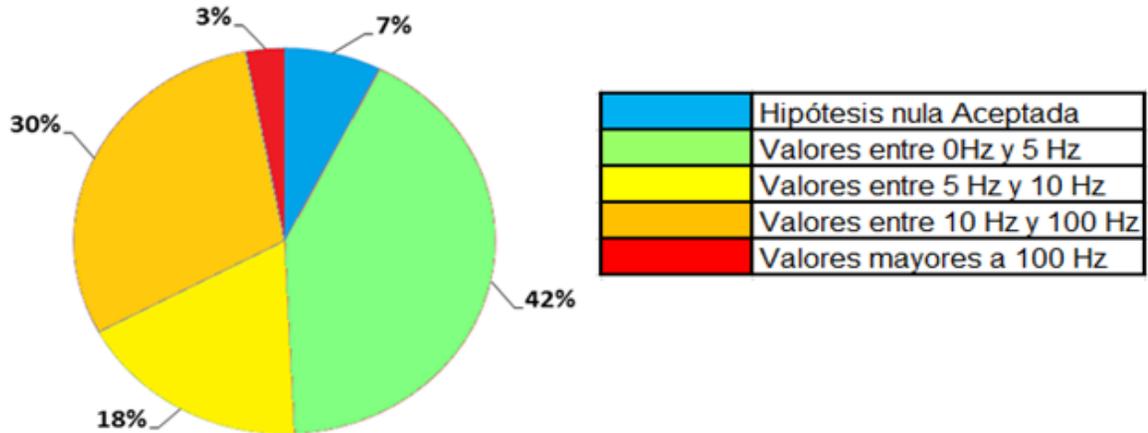
Configuraciones		Intervalo de confianza EMA		Frecuencia natural OMA		DELTA [Hz]	
		Vci [Hz]	Vcs [Hz]	UPC [Hz]	EFDD [Hz]	UPC	EFDD
EMA	OMA						
Placa con motor impactos	Placa con motor 1500 RPM	180,55	180,97	172,2	175,3	8,35	5,25
		419,29	419,82	398,7	415	20,59	4,29
		752,76	755,13	598,2	778,2	154,56	23,07
		1007,66	1010,98	976,4	971	31,26	36,66
Rotorkit impactos	Rotorkit 1500 RPM	178,18	179,27	173,5	172,2	4,68	5,98
		391,26	393,39	397,4	384,4	4,01	6,86
Rotorkit barrido sinusoidal	Rotorkit 1500 RPM	174,73	174,73	173,5	172,2	1,23	2,53
		391,75	391,96	397,4	384,4	5,44	7,35
Rotorkit excitación aleatoria	Rotorkit 1500 RPM	174,73	174,73	173,5	172,2	1,23	2,53
		391,75	391,96	397,4	384,4	5,44	7,35

Fuente: Tabla generada a partir de la información contenida en el ANEXO E, y las tablas resultados OMA

Convención:

	Menores a 0 Hz (En este caso la hipótesis nula ha sido Aceptada en prueba de hipótesis)
	Valores entre 0Hz y 5 Hz
	Valores entre 5 Hz y 10 Hz
	Valores entre 10 Hz y 100 Hz
	Valores mayores a 100 Hz

Figura 57. Distribución porcentual del valor DELTA



Con relación al diagrama mostrado en la figura anterior, creada a partir de la Tabla 15, se visualiza que tan solo el 7% de los casos aceptan la hipótesis nula. De igual modo, se observa que un 60% de los casos, donde la prueba de hipótesis es rechazada, los valores delta se encuentran entre 0 y 10 Hz; de los cuales, el 49% no excede los 5 Hz. Además se observa, que en el 33% de los casos, el valor delta es mayor a 10 Hz, dentro de los cuales solo el 3% excede los 100 Hz.

La decisión definitiva en tolerar o no, las diferencias que se presentan entre EMA y OMA para los casos evaluados en esta tesis, los cuales se exponen de manera objetiva en las secciones anteriores, *3.5.2 Prueba de hipótesis* y *3.5.3 Estadísticos complementarios*, dependerá del criterio del analista de vibraciones para cada caso en específico.

4 CONCLUSIONES

- Gracias a la información recolectada en la revisión bibliográfica en este proyecto de grado, se sintetizó información acerca de aspectos teóricos y casos de estudios realizados alrededor del análisis modal experimental y operacional. En lo que concierne al estado actual de la tecnología para el análisis modal operacional, se observó que este tema se ha venido desarrollando fuertemente en las últimas dos décadas gracias a los avances en la electrónica, en cuanto a la instrumentación empleada para el control y los software para el procesamiento de señales.
- La labor de reconocimiento, inspección y adecuación de equipos, herramientas e instrumentos desarrollada antes de los ensayos modales, fue un aspecto primordial para el desarrollo de los análisis modales experimentales y operacionales, por medio de ellos se identificaron falencias e inconvenientes técnicos relativos a la instrumentación y al manejo del software Labview, permitiendo realizar una planeación para los ensayos en las distintos sistemas bajos diferentes configuraciones.
- A partir de una mejora en la interfaz gráfica de los programas utilizados para los ensayos, fue posible tener una mejor visión de los resultados y un mayor control en la ejecución de los ensayos que se realizaron.
- ANSYS WORKBENCH, en su módulo de análisis modal, es una herramienta para obtener una idea preliminar sobre la forma modal y valores aproximados de las frecuencias naturales. Sin embargo en algunos casos específicos, como en el Rotorkit, las frecuencias naturales presentaron alta diferencia a las estimadas de modo experimental.

- Según lo observado en los ensayos modales experimentales sobre los sistemas analizados, los modos vibratorios son independientes del tipo de excitación.
- Para sistemas tales como el eje, el cual tiene poca masa y una geometría cilíndrica, la cual desfavorece la instalación de sensores en las mediciones; no fue posible tener certeza acerca de la caracterización modal, por la alta dispersión presente en las mediciones realizadas.
- Las formas modales obtenidas con ARTeMIS son coherentes con las obtenidas por la forma experimental (EMA).
- Los errores calculados en EMA son bajos, en su mayoría menores a 3 Hz esto hace que el intervalo de confianza que se aplica en la prueba de hipótesis sea ajustado, haciendo que la prueba sea exigente y por ello descartando en la mayoría de casos la hipótesis nula, $H_0: EMA = OMA$.
- En los casos donde no se pueda hacer un análisis modal experimental, ARTeMIS puede brindar una información aproximada acerca de los parámetros modales de interés.
- Para los casos en que se excitan los sistemas o estructuras con fuentes armónicas, como por ejemplo un motor eléctrico, existe grandes dificultades para el software ARTeMIS en identificar de forma automática, los parámetros modales de interés, teniendo que ajustar el modelo según sea el caso y por juicio de un experto en el tema.

- Finalmente a partir de la revisión bibliografía sobre ensayos modales y de los resultados obtenidos en el proceso de experimentación, para realizar un análisis modal en operación se requieren otro tipo de sensores a los que se emplearon en esta tesis sobre el Rotorkit, tales como sensores lineales de velocidad o sensores de proximidad, los cuales permiten llegar a conocer las características vibratorias del Rotor, el elemento principal de una rotor maquinaria.

5 RECOMENDACIONES

- En la parte EMA, se recomienda abarcar el tema del “Damping” otro de los parámetros de vital importancia para caracterizar modalmente un sistema, para esta labor se requiere realizar un programa en Labview o en Matlab para poder medir este parámetro de forma experimental.
- La adquisición de otros equipos complementarios a los disponibles en el laboratorio, como sensores lineales de velocidad y desplazamiento, de proximidad, también sensores para bajas frecuencias, esto para el caso de estructuras que se quieran caracterizar modalmente en operación.
- Para las mediciones de las respuestas vibratorias realizadas en el OMA, los sensores de referencia, deben ser en puntos donde se presente las máximas amplitudes de movimiento a las distintas frecuencias naturales
- Para ARTeMIS aproximarse mejor al valor de la frecuencia natural, necesita un alto volumen de datos, por mediciones en el tiempo, ya que el software se basa en un procedimiento estadístico (estocástico), y a mayor cantidad de datos lograra tener una buena exactitud en la estimación de los parámetros.
- En lo que se refiere análisis modelos operaciones en rotor maquinaria, hay necesidad de comenzar a hacer mayores revisiones bibliográficas, experimentación y estudios pertinentes a este tema.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] He, Jimin and Fu, Zhi-Fang. *Modal Analysis*. Editorial Butterworth-Heinemann. 2001.
- [2] D.J. Ewins. *Modal Testing*. 2da Edition. London, Editorial Wiley, 2000.
- [3] R.H. Plaut, Snap loads and torsional oscillations of the original Tacoma Narrows Bridge, *Journal of Sound and Vibration*, Volume 309, Issues 3-5, 22 January 2008, Pages 613-636, ISSN 0022-460X, DOI: 10.1016/j.jsv.2007.07.057.
- [4] Irvine, Tom. *An introduction to frequency response functions*. 2000
- [5] Notas de clase de la asignatura Sonido y Vibraciones, primer semestre de 2010, Universidad Pontificia Bolivariana.
- [6] Tomada de la página de "AZIMA DLP":
<http://www.dliengineering.com/vibman-spanish/formademodo1.htm>
Consultada el 10 Junio 2011
- [7] Harris, C. M. *Shock and vibration handbook*. Quinta edición de McGraw-Hill. 2002.
- [8] De Silva, C. W. *Vibration damping, control and design*. Editorial Crc Press. 2007
- [9] F. Magalhães y Á. Cunha, «Explaining operational modal analysis with data from an arch bridge», *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 25, Jul. 2011, págs.1431-1450.
- [10] N.A.J. Lieven y D.J. Ewins, «The context of experimental modal analysis», *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A:*

Mathematical, Physical and Engineering Sciences, vol. 359, Ene. 2001, págs. 5-10.

[11] E. Reynders y G. De Roeck, «Reference-based combined deterministic-stochastic subspace identification for experimental and operational modal analysis», *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 22, Abr. 2008, págs. 617-637.

[12] HELP ARTEMIS EXTRATOR PRO

[13] P. Andersen, «Identification of civil engineering structures using vector ARMA models», *Aalborg University, Aalborg, Denmark*, 1997.

[14] Tomada de la página de “SVS”:

http://www.svibs.com/solutions/literature/Note_on_SSI.htm

Consultada el 12 Junio de 2011

[15] E. Parloo, P. Verboven, P. Guillaume, Y M. Van Overmeire, «Sensitivity-Based Operational Mode Shape Normalisation», *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 16, Sep. 2002, págs. 757-767.

[16] Tomada de la página de “vibrant technology”

<http://www.vibetech.com/go.cfm/en-us/content/index/x?>

Consultada el 11 Junio de 2011

[17] Tomada de la página de “Brüel&Kjær”:

<http://www.bksv.com/AboutUs/AboutBruelAndKjaer.aspx>

Consultada el 11 Junio de 2011

[18] Tomada de la página de “LMS”:

<http://www.lmsintl.com/testing/structures/operational-modal-analysis>

Consultada el 11 Junio de 2011

- [19] Hernández, Emil. *Manual de estadística: Handbook of statistics*. Universidad Cooperativa de Colombia. 2006
- [20] W, Mendenhall, *Introducción a la probabilidad y estadística*, Cengage Learning Editores, 2007.
- [21] ARIZA, Johana. Seminario de investigación en métodos probabilísticos aplicados al diseño de experimentos par ingenieros. Bucaramanga, 2010, Págs. 519. UIS. Ingenierías físico mecánicas. Escuela de Ing. Mecánica
- [22] BENTLY NEVADA. *RK4 Rotor Kit: Asset Condition Monitoring*. 2000.
- [23] NASSIS, Athanasios. «*Rotor Dynamic Testrings*». *Lulea university technology, Sweden, 2010*.
- [24] Tomada de la página de "SVS":
http://www.svibs.com/solutions/case_studies/case_infante_henrique_bridge.aspx
Consultado el día 10 de Junio de 2011
- [25] S. Chauhan et al., «Operational Modal Analysis of Operating Wind Turbines: Application to Measured Data», in *Rotating Machinery, Structural Health Monitoring, Shock and Vibration, Volume 5*, T. Proulx, Ed. New York, NY: Springer New York, 2011, págs. 65-81.
- [26] G. S, M. N, H. H, y K.-H. H, «Frequency Domain Techniques for Operational Modal Analysis.», *Proceedings. JSAE Annual Congress*, n°. 68-02, págs. 17-20, 2002.
- [27] Software ANSYS, Licencia research
- [28] Software Labview 2009, Licencia de Campus
- [29] Software ARTeMIS Extractor Pro, Licencia Académica

ANEXOS

ANEXO A
VI'S LABVIEW

VI'S LABVIEW
PARA EMA

VI Modal Impact Test

(Software para ensayo modal de impacto)

Respuesta de excitación y controles de señales | Respuesta con dominio en tiempo y frecuencia | Función de respuesta en frecuencia | ANALISIS MODAL EXPERIMENTAL / EMA IMPACT TEST

Control de Señal FRF - 1

FRF mode: HI | Averages completed: 0 | restart averaging (F)

averaging parameters: No averaging, Exponential, 10, linear mode, One shot

Spectrum view: dB On (T), unwrap phase (F), convert to degree (T)

Control de Señal FRF - 2

FRF mode: HI | averages completed: 0 | restart averaging (F)

averaging parameters: No averaging, Exponential, 10, linear mode, One shot

Spectrum view: dB On (T), unwrap phase (F), convert to degree (T)

Trigger: 0

fuerza Martillo: 0

STOP

Martillo (Power Spectrum)

Martillo

Respuesta de excitación y controles de señales | Respuesta con dominio en tiempo y frecuencia | Función de respuesta en frecuencia | ANALISIS MODAL EXPERIMENTAL / EMA IMPACT TEST

Accel 1

Cursors:		
	X	Y
Fn1	0.68822	0
Fn2	0	0.139186

Accel 2

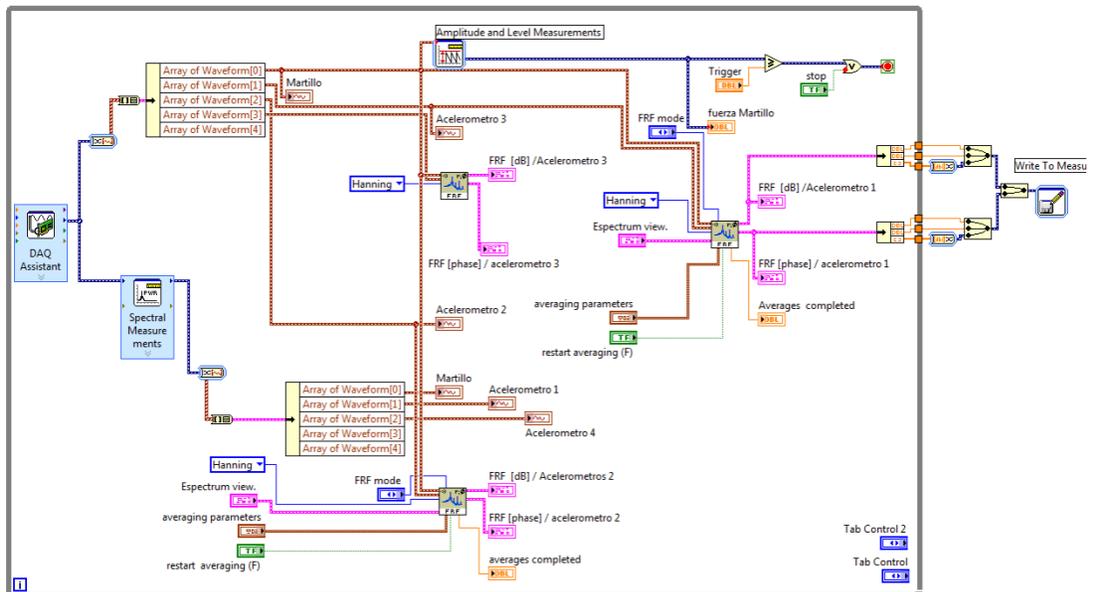
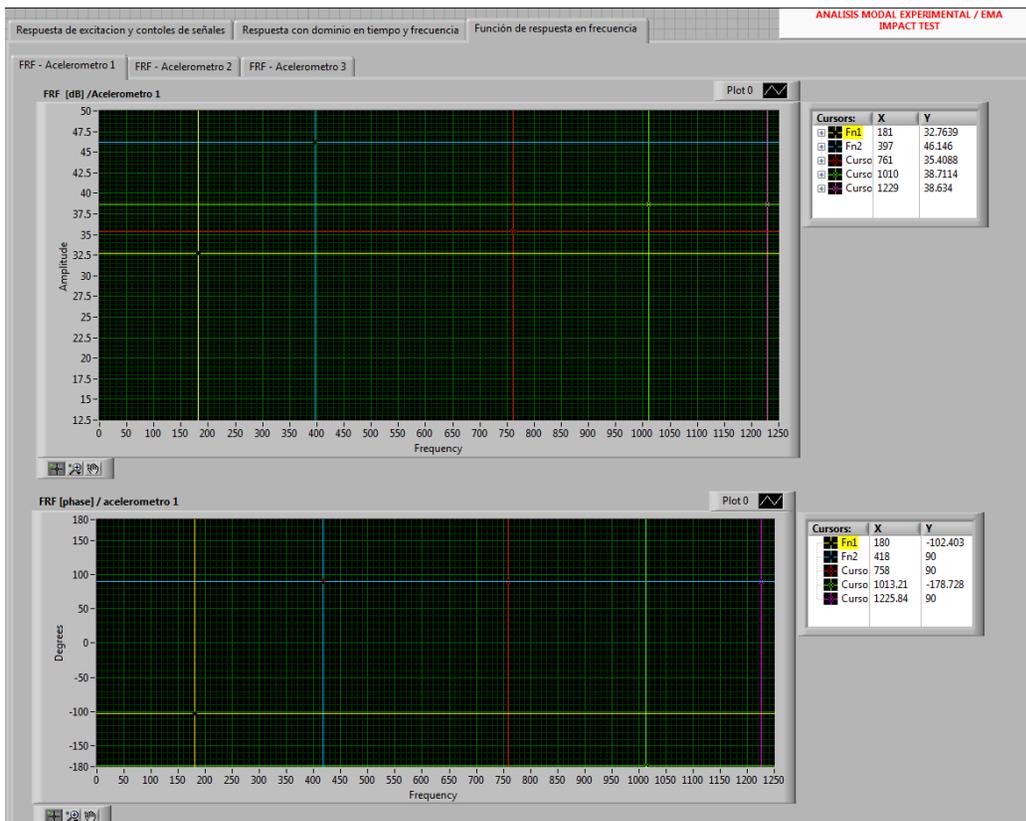
Cursors:		
	X	Y
Fn1	0.496269	0
Fn2	0	0.057034

Accel 1 (Power Spectrum)

Cursors:		
	X	Y
Fn1	363.468635	-16.2376
Fn2	0	-17.2448
Fn3	0	-17.2448

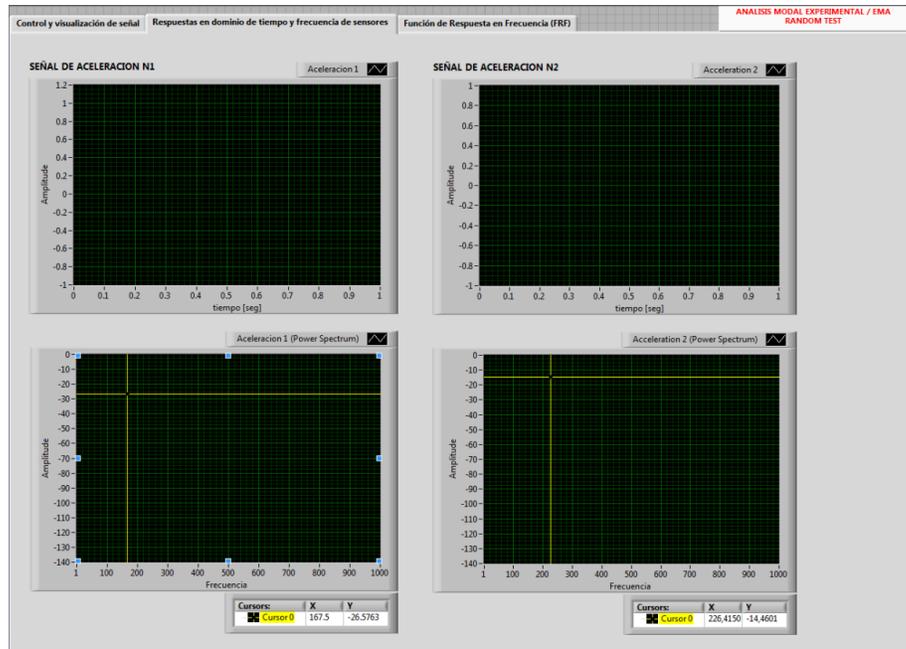
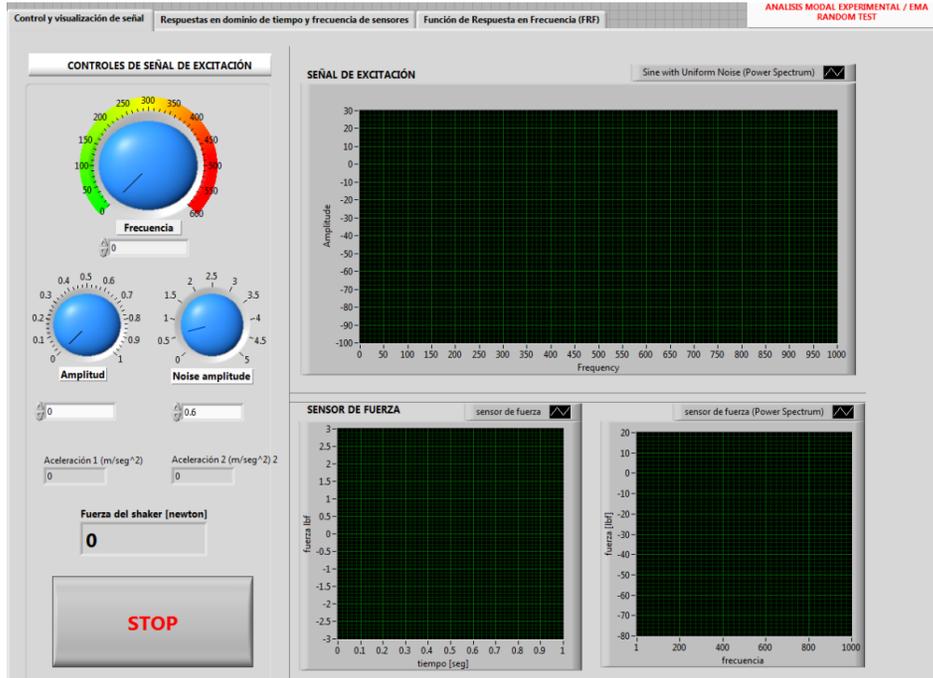
Accel 2 (Power Spectrum)

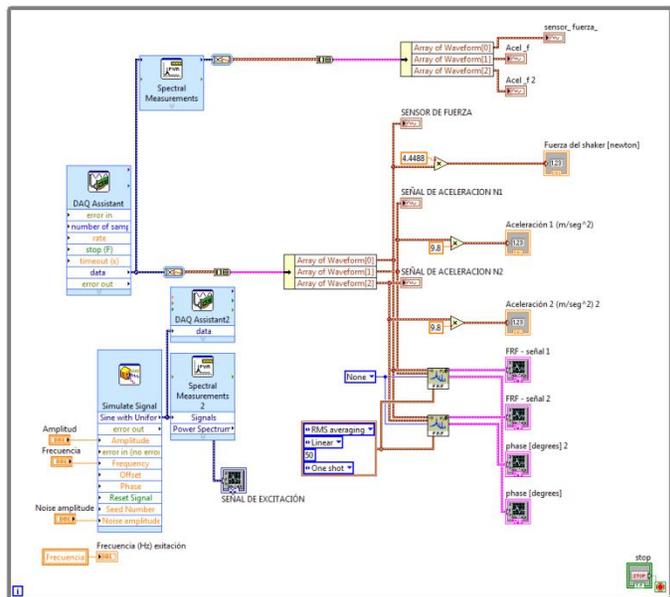
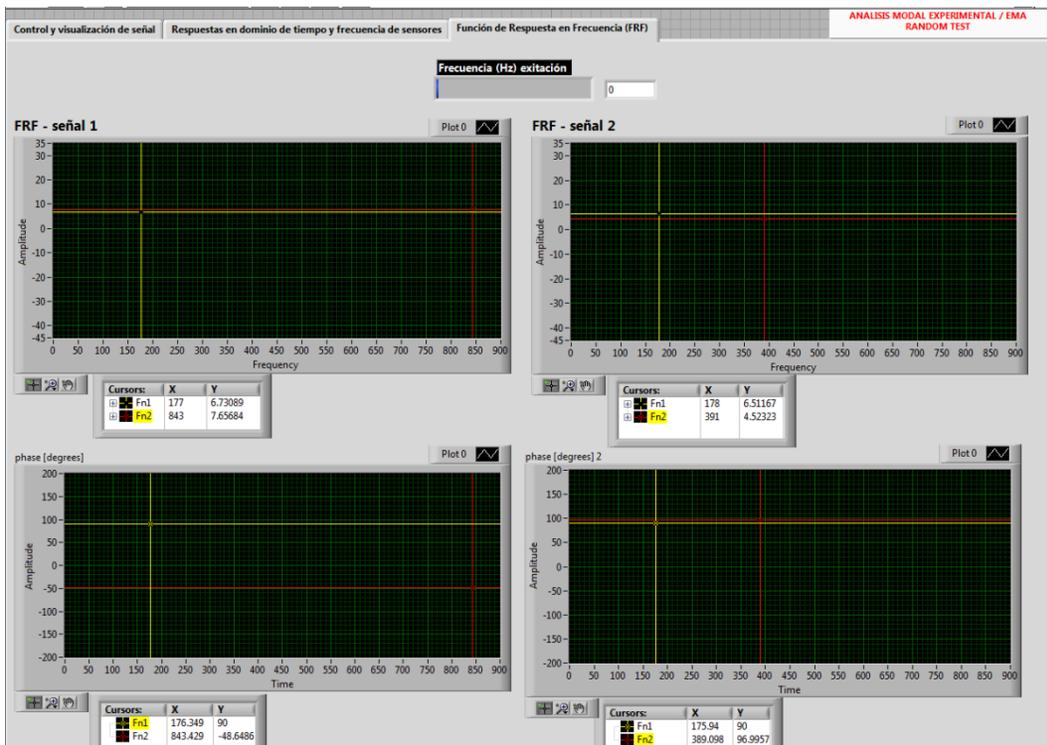
Cursors:		
	X	Y
Fn1	369.00369	-36.8902
Fn2	0	-25.4747
Fn3	0	-25.4747



VI modal random testing

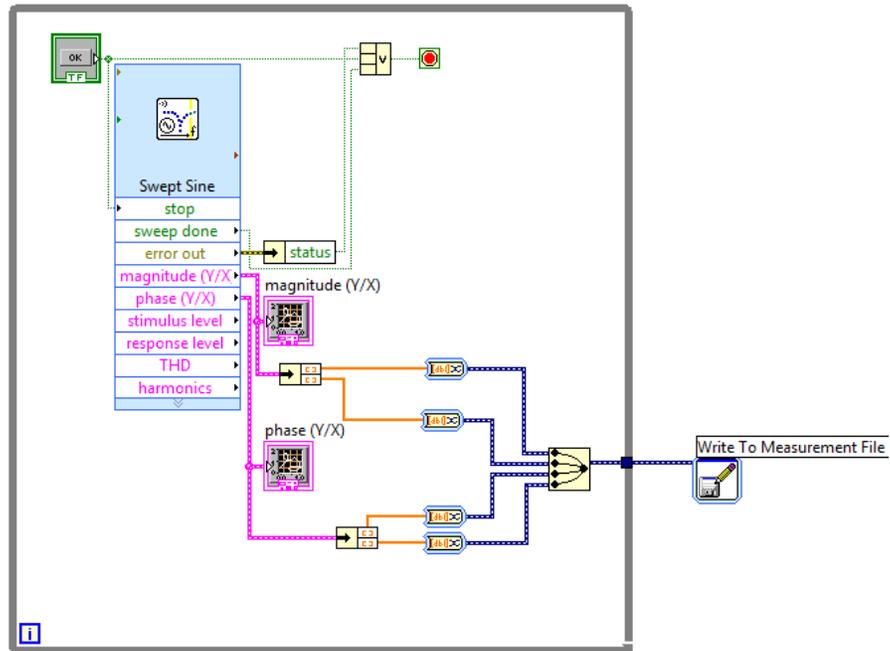
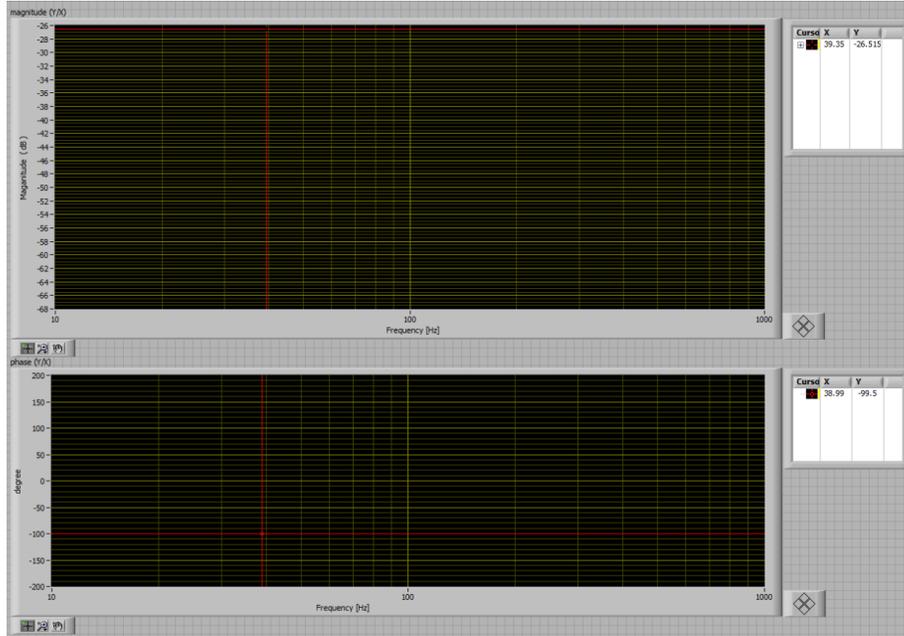
(Software para ensayo modal con excitación aleatoria)





VI modal swept test

(Programa para ensayo modal con barrido sinusoidal)

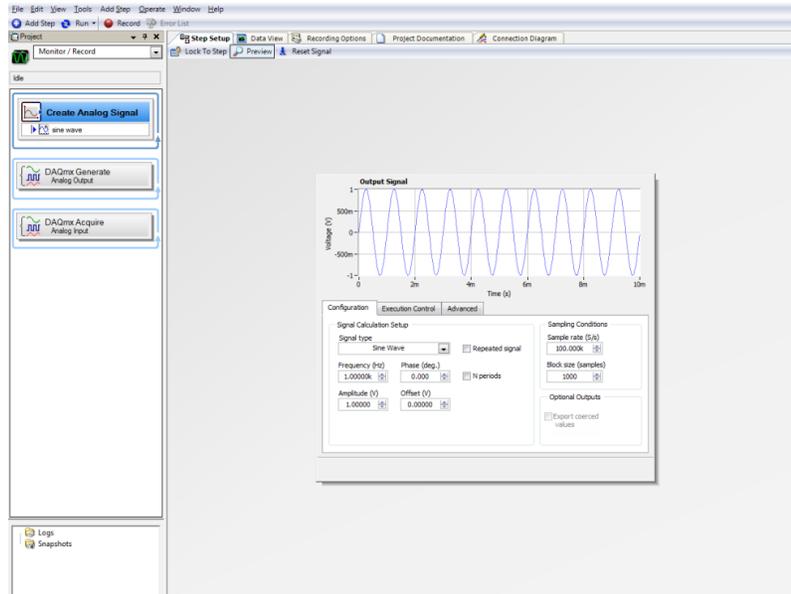


VI'S LABVIEW

PARA OMA

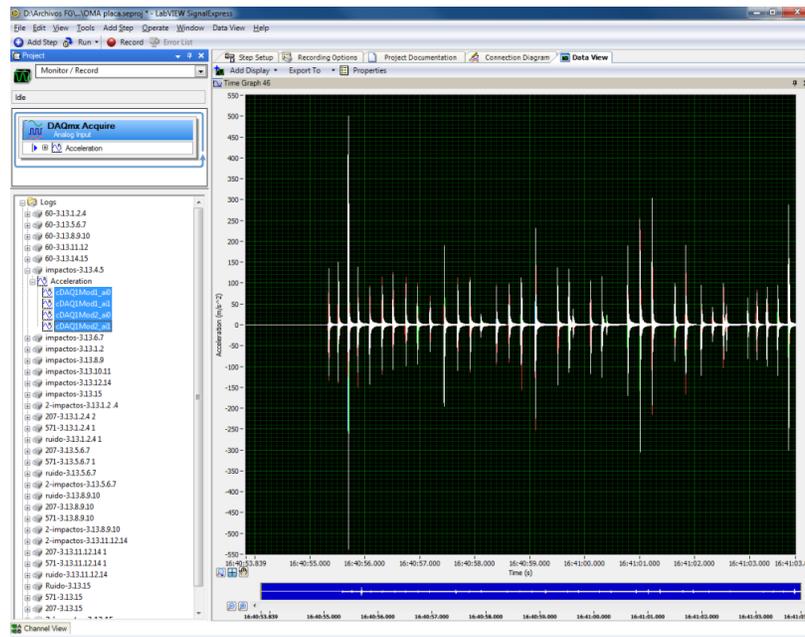
VI OMA 1

(Empleado para ensayo modal operacional con excitación sinusoidal en placa y eje)



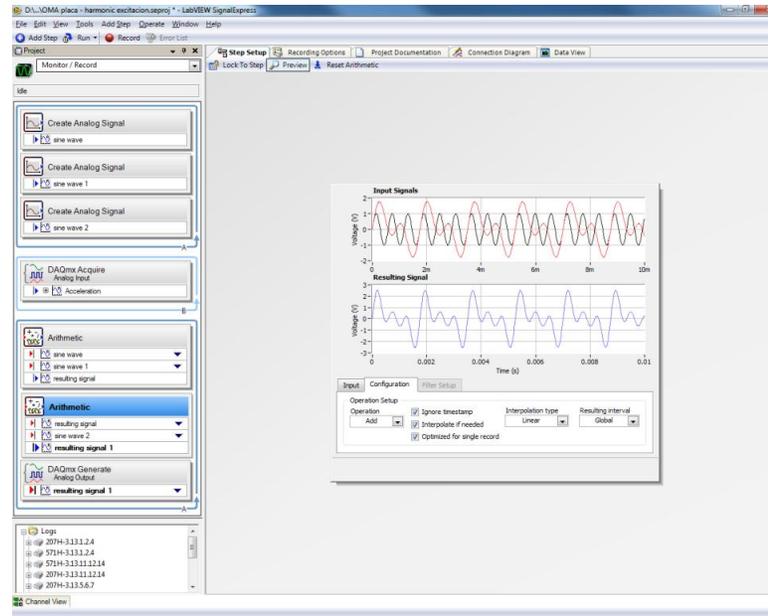
VI OMA 2

(Empleado para ensayo modal operacional con excitación por impacto en placa y eje)



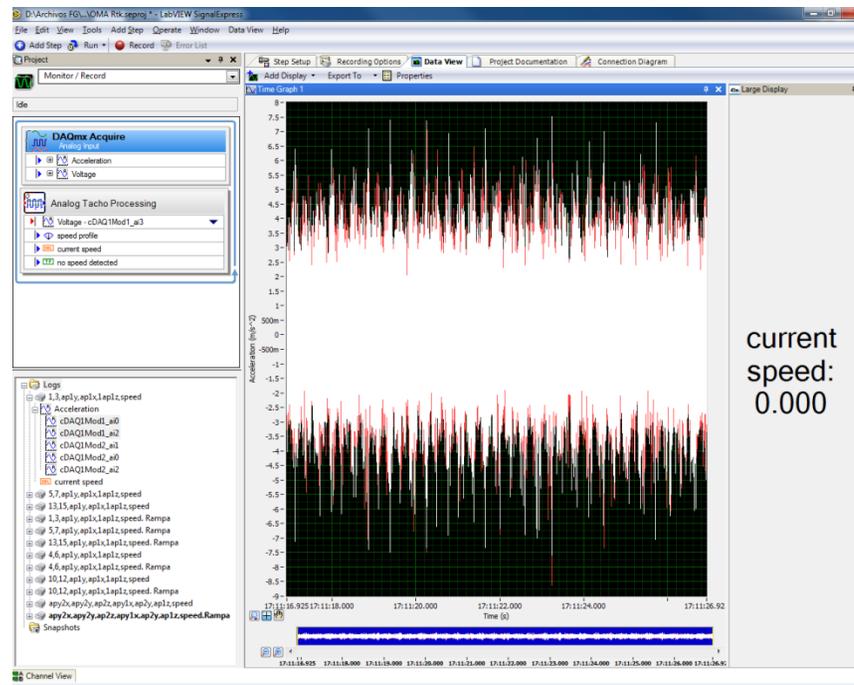
VI OMA 3

(Empleado para ensayo modal operacional con excitación armónica en placa y eje)



VI OMA 4

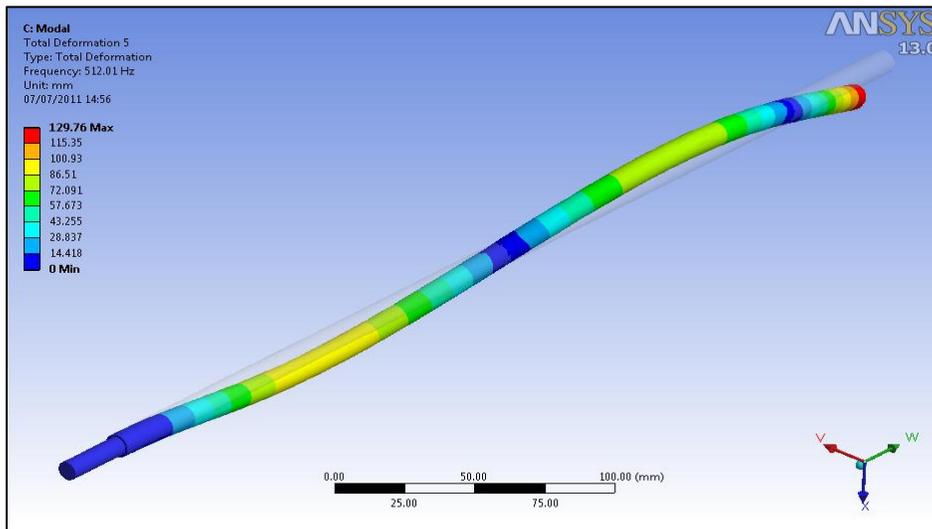
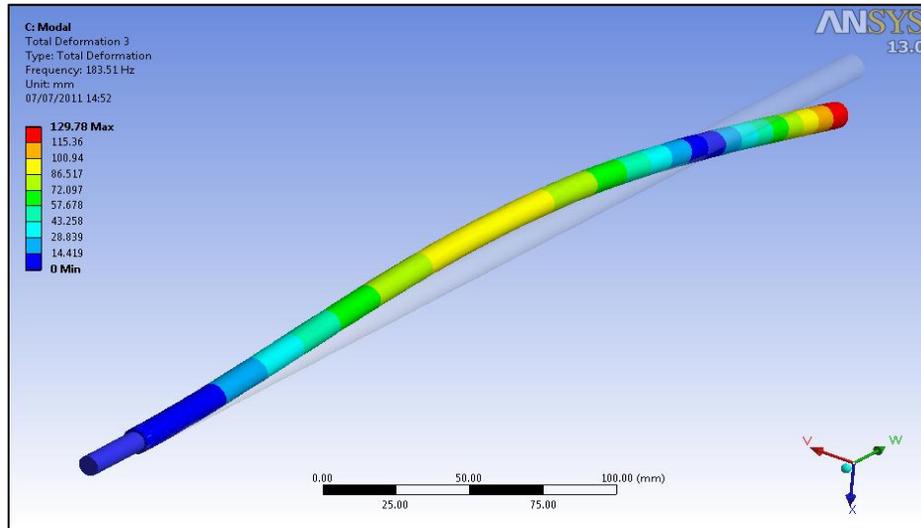
(Empleado para ensayo modal operacional con excitación por motor en placa con motor y rotorkit)

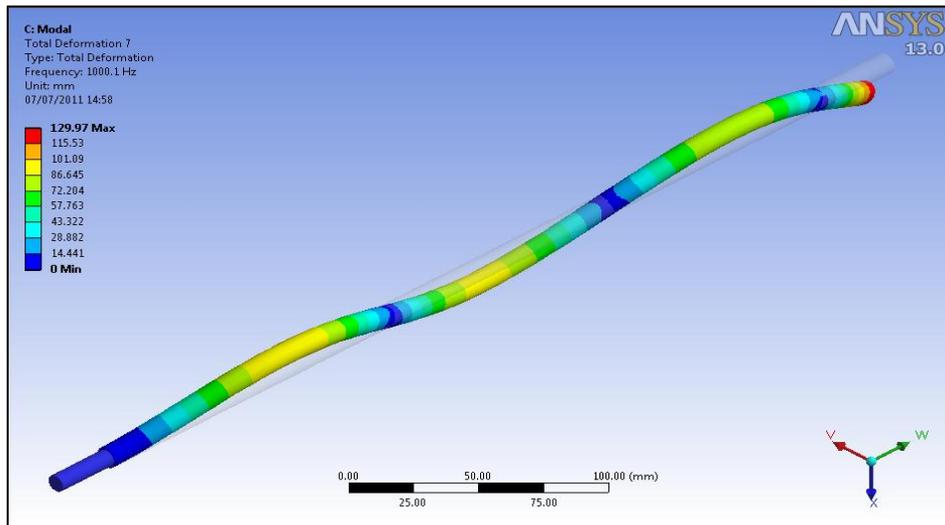


ANEXO B

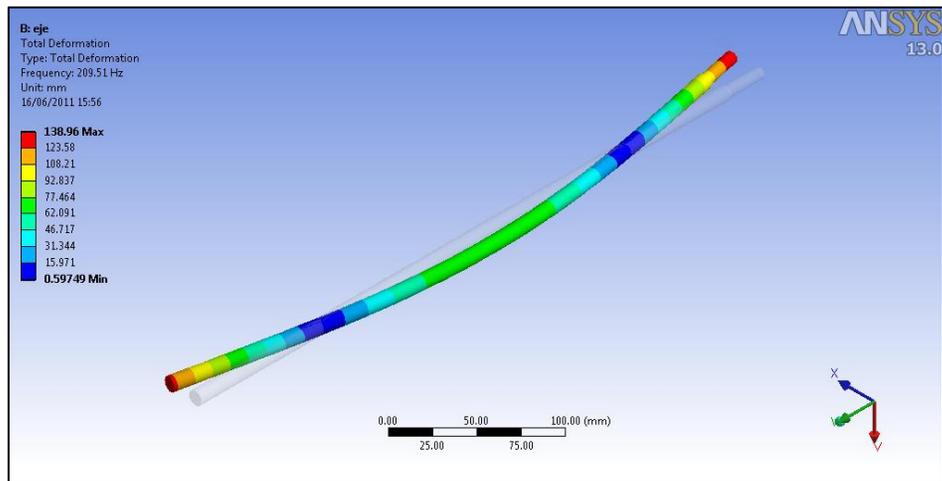
RESULTADOS ANSYS

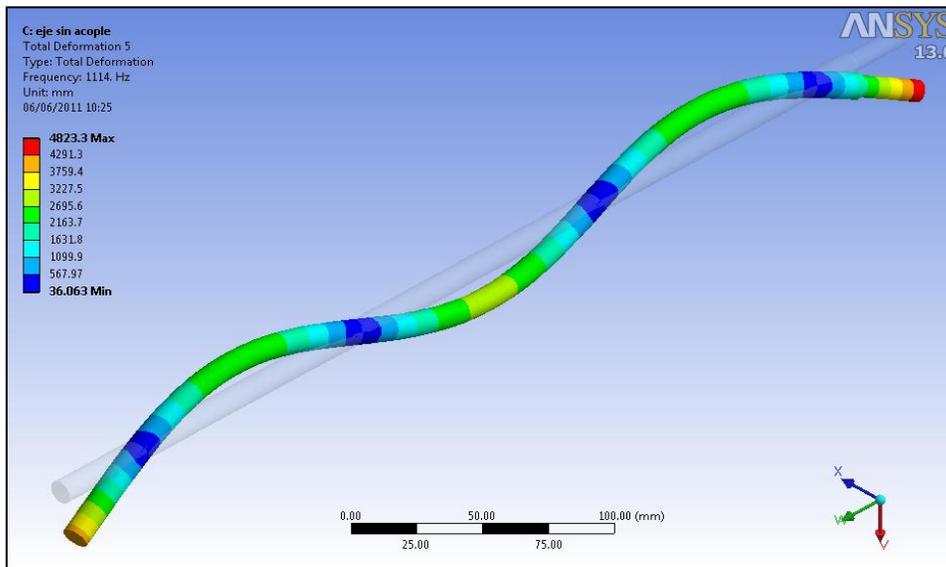
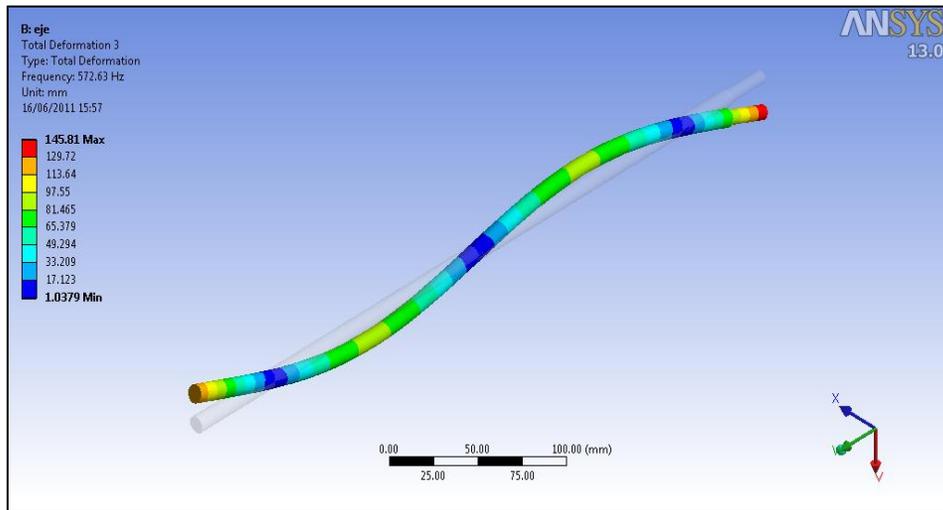
RESULTADOS DE ANÁLISIS MODAL EN ANSYS DEL EJE PARA EL PRIMER MONTAJE



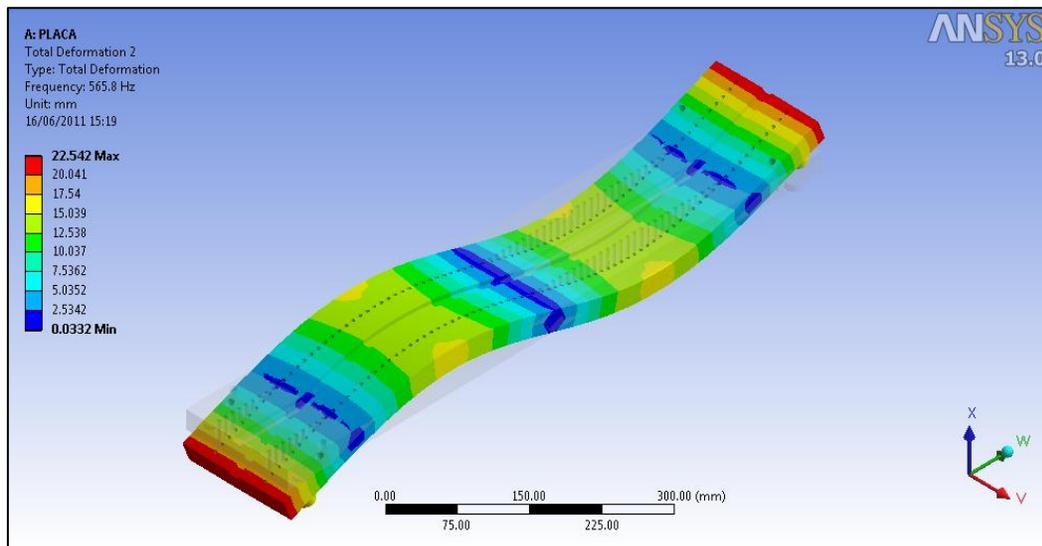
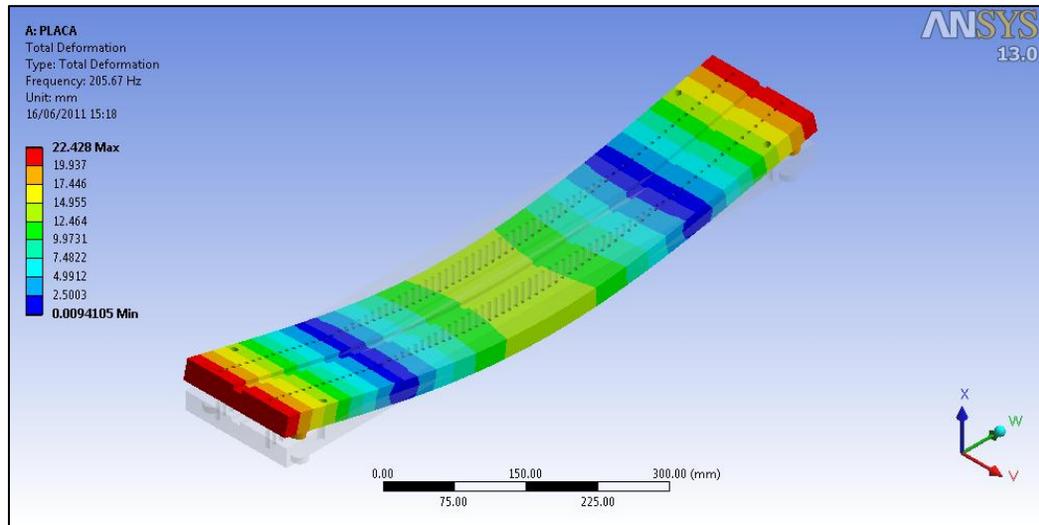


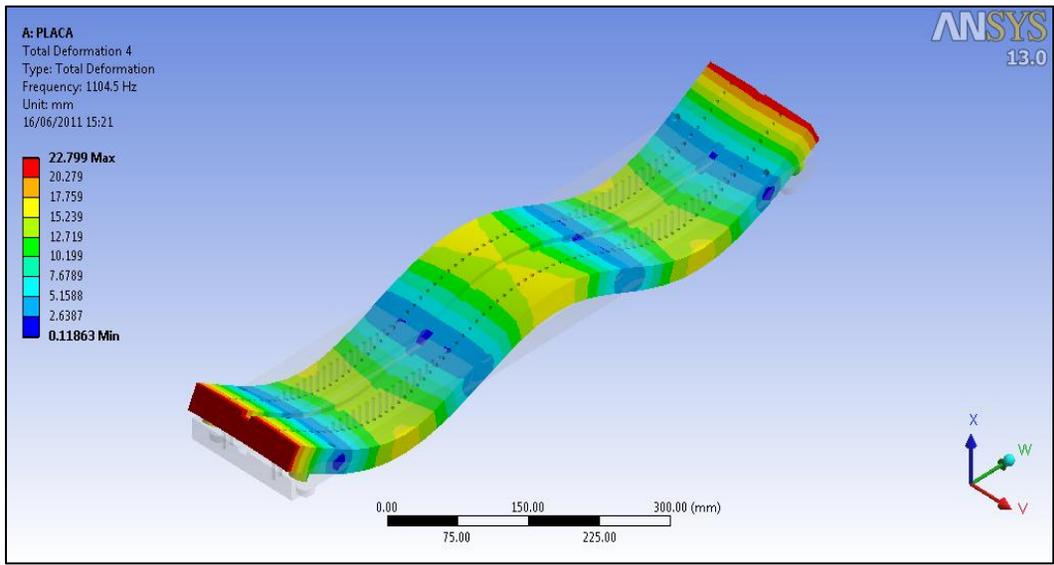
RESULTADOS DEL ANÁLISIS MODAL EN ANSYS DEL EJE PARA EL SEGUNDO MONTAJE



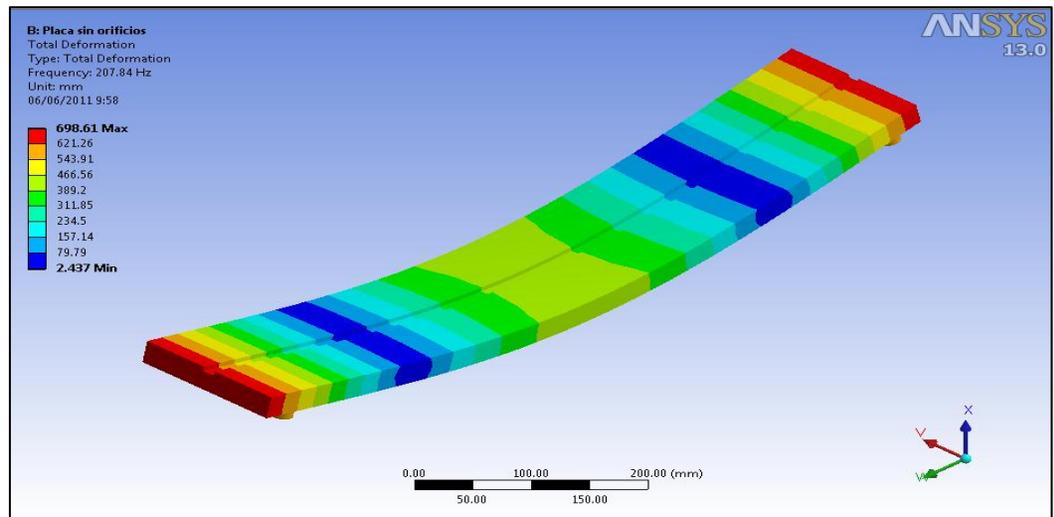


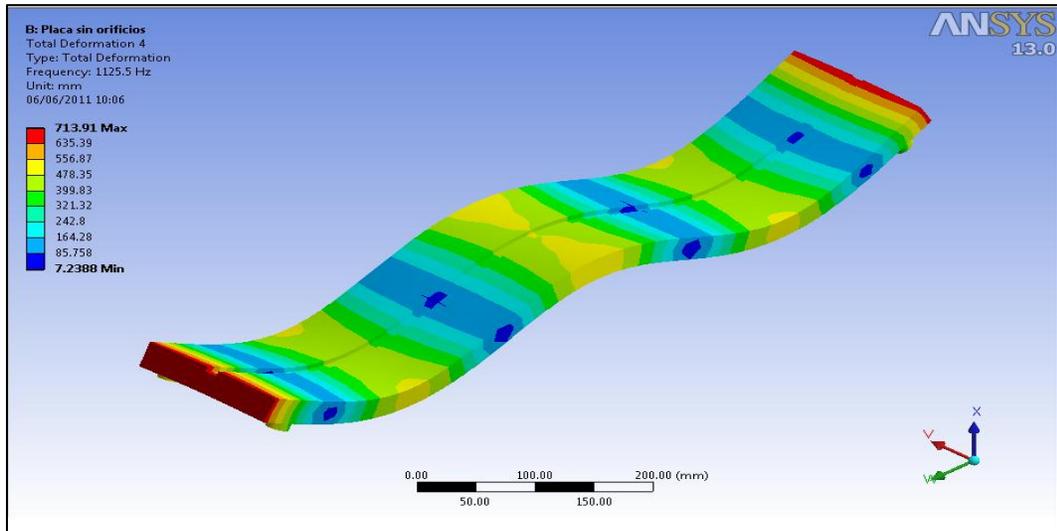
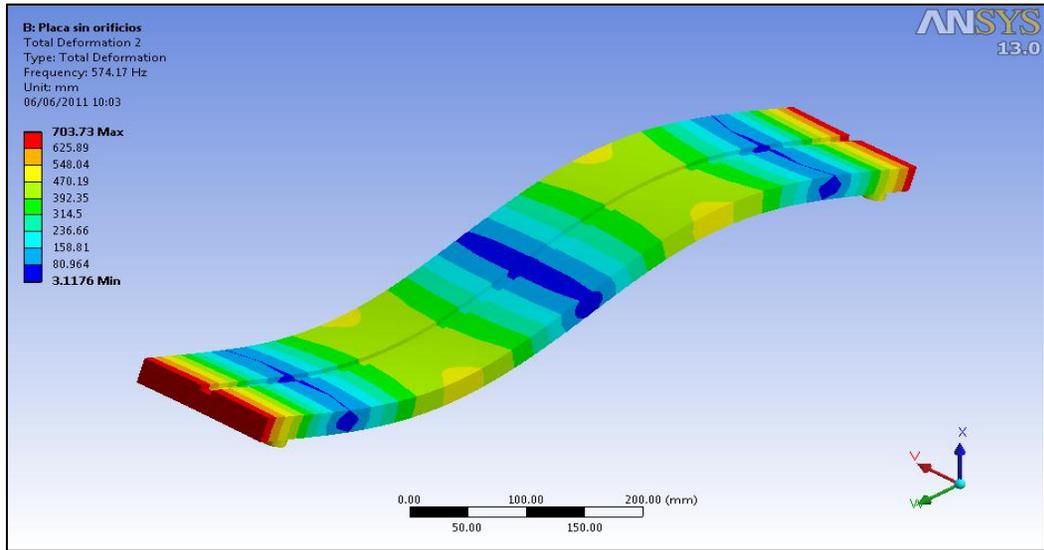
RESULTADOS DE ENSAYO MODAL EN ANSYS DE PLACA CON AGUJEROS



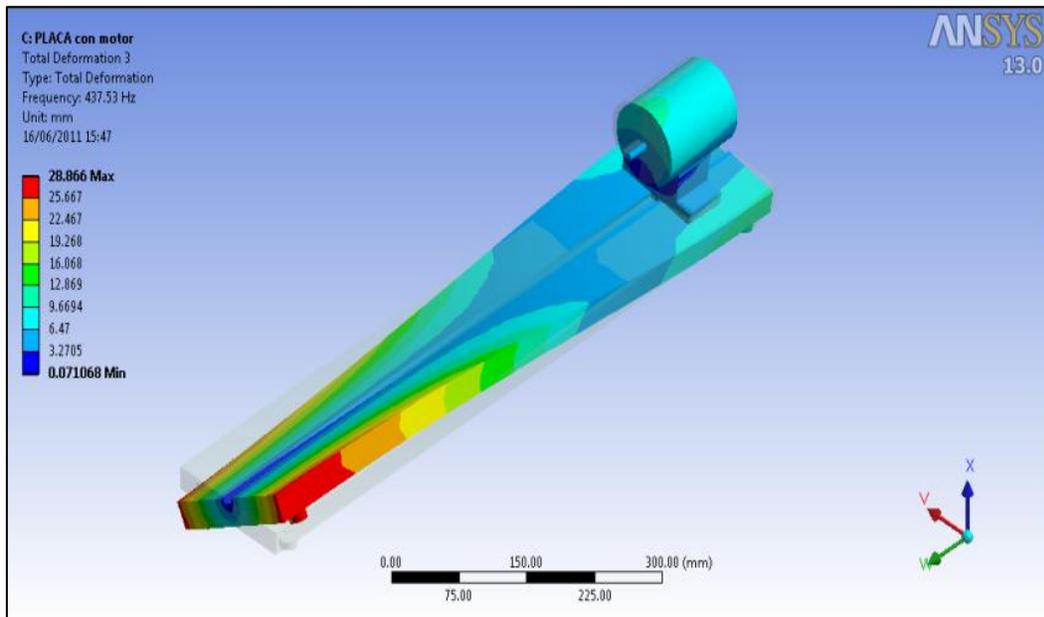
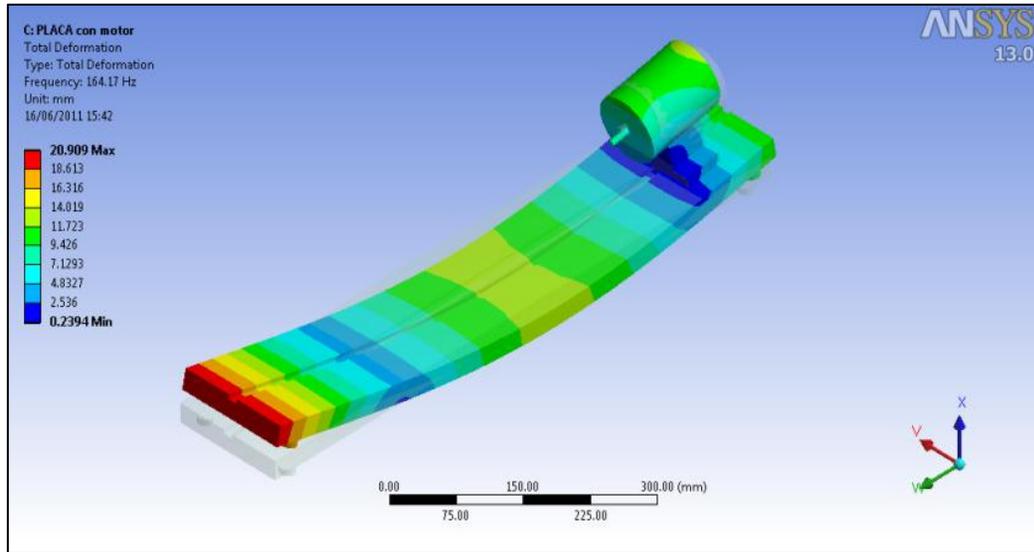


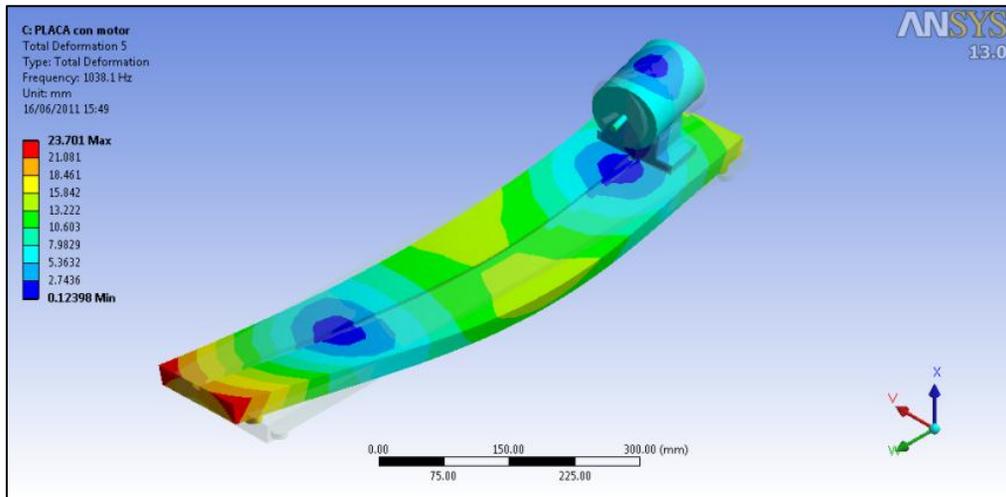
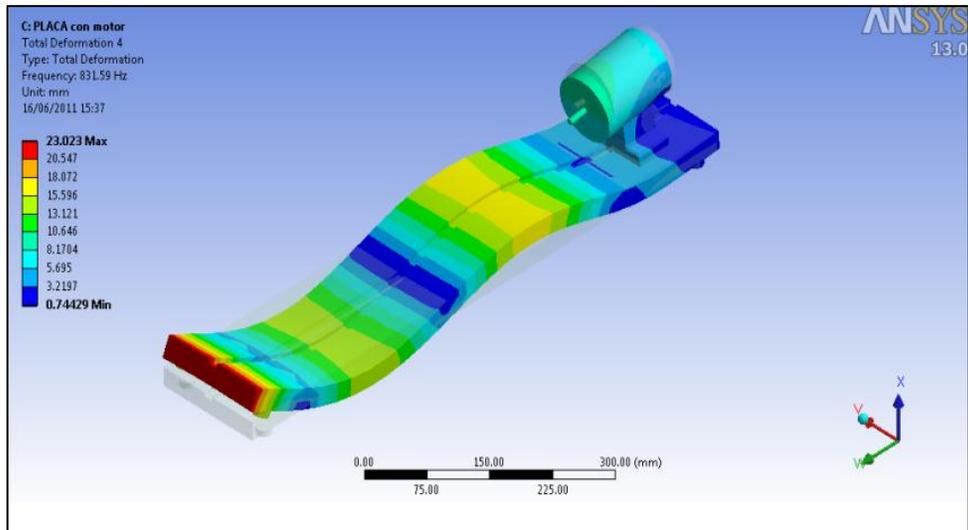
RESULTADOS DE ENSAYO MODAL EN ANSYS DE PLACA SIN AGUJEROS



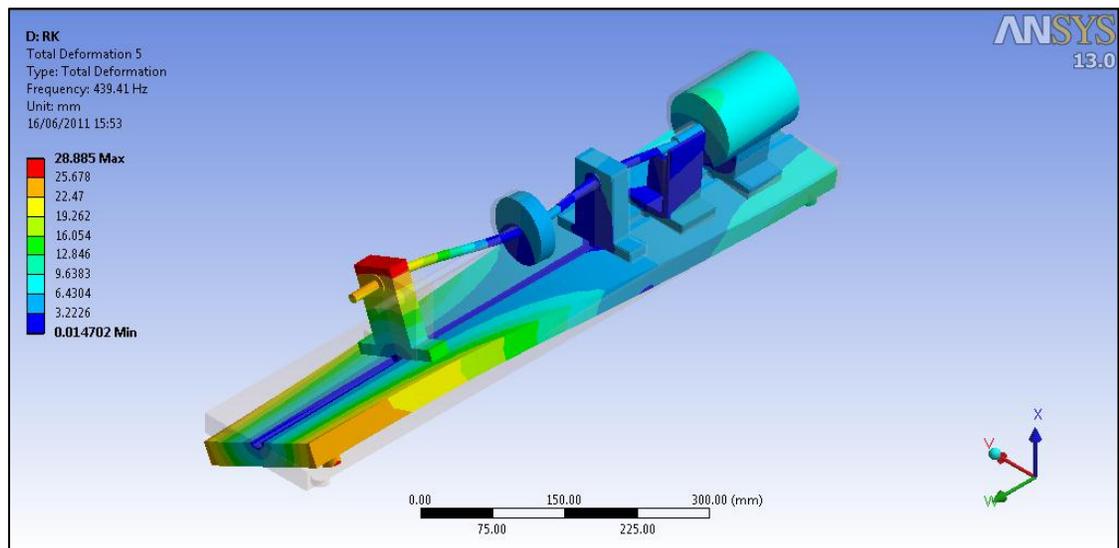
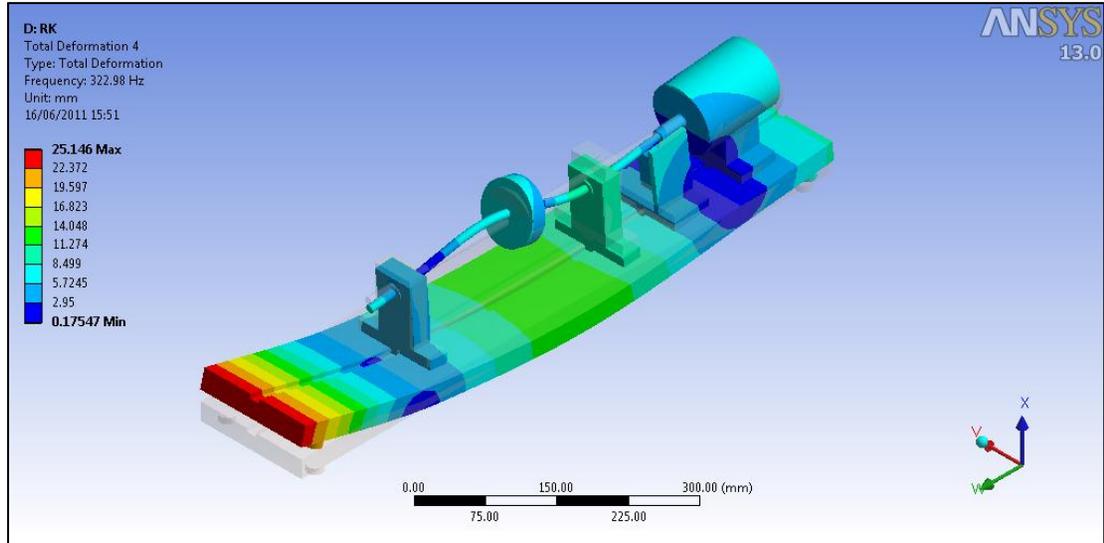


RESULTADOS DE ENSAYO MODAL EN ANSYS DE PLACA CON MOTOR





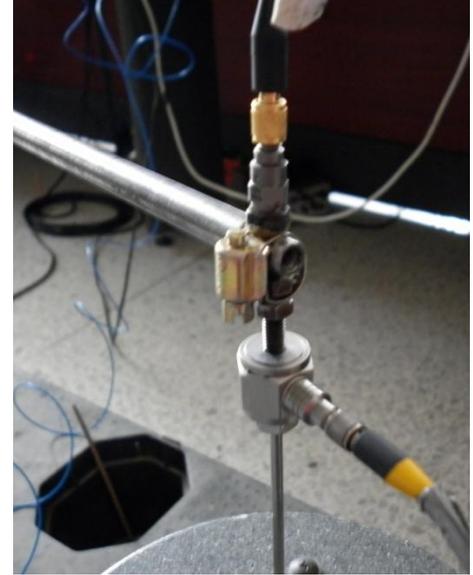
RESULTADOS DE ENSAYO MODAL EN ANSYS DE ROTORKIT



ANEXO C
MONTAJE PARA EMA

Montajes para ensayo modal en el eje

Montaje 1



El primer montaje, se realiza para los ensayos modales donde se requiera excitar la pieza, por medio de una señal periódica, como por ejemplo una un barrido de frecuencia de una señal sinusoidal, o una señal aleatoria, como por ejemplo ruido blanco. Para los ensayos con este tipo de excitación se emplea un shaker electromagnético

Montaje 2



El segundo montaje, se realiza para los ensayos modales donde se requiera excitar la pieza, por medio de una señal de impulso, como por ejemplo un impacto. Para los ensayos modales con este tipo de excitación se empleó un HAMMER.

Montaje para ensayo modal para Rotorkit



Al igual que en el eje se emplean los distintos tipo de excitación para la placa, placa con motor y Rotorkit. En las figuras que se muestran la parte superior del texto, se observa el montaje para los ensayos modales de impacto, mientras que en la figura de la parte inferior del texto, se observa el montaje para los ensayos modales con barrido sinusoidal y excitación con señal aleatoria.

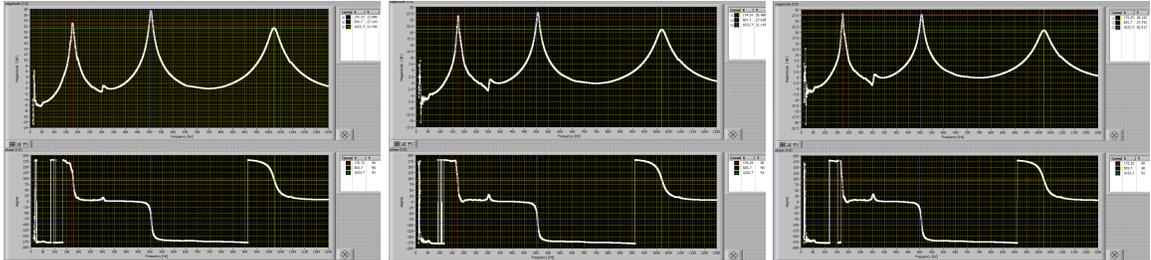


ANEXO D

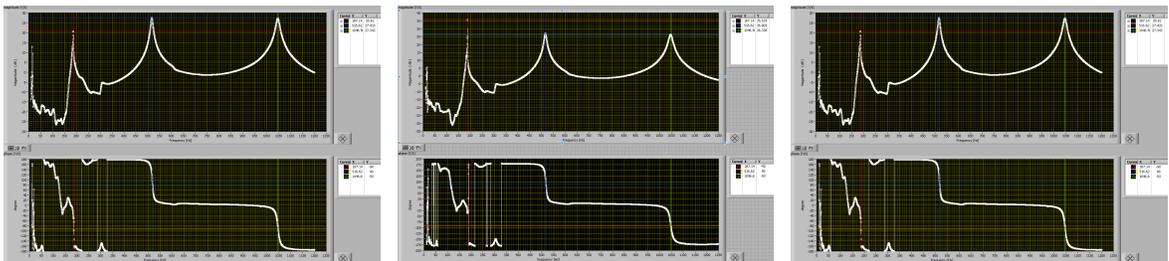
ESPECTROS DE EMA

ESPECTROS DE EMA

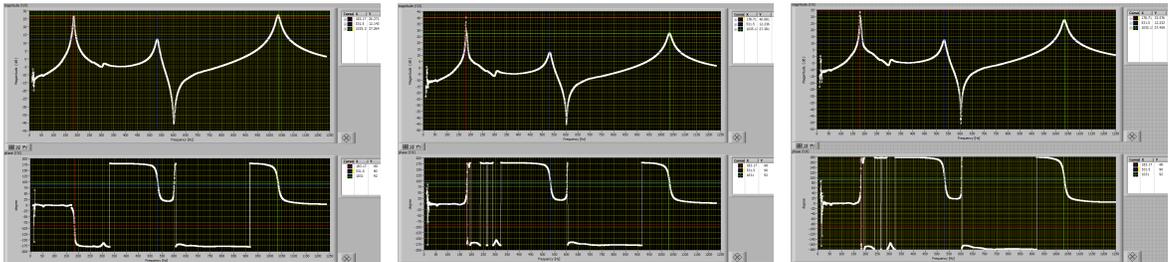
Espectro. 1: Ensayo modal con barrido sinusoidal en eje- medición punto A



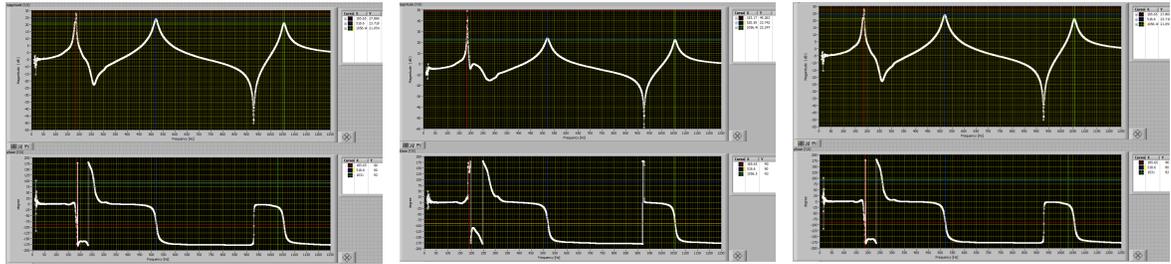
Espectro. 2: Ensayo modal con barrido sinusoidal en eje- medición punto B



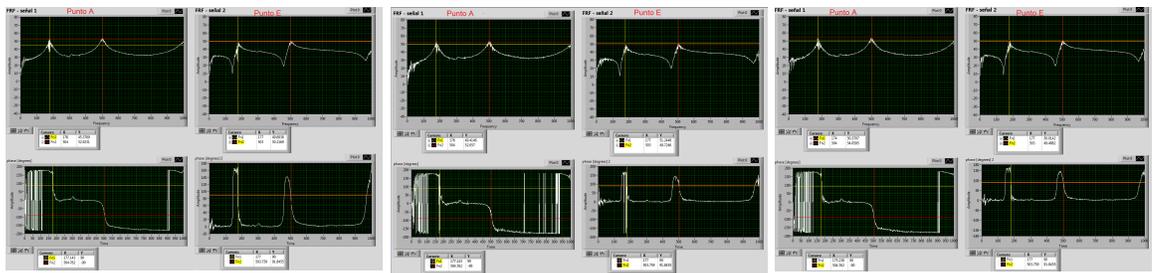
Espectro. 3: Ensayo modal con barrido sinusoidal en eje- medición punto C



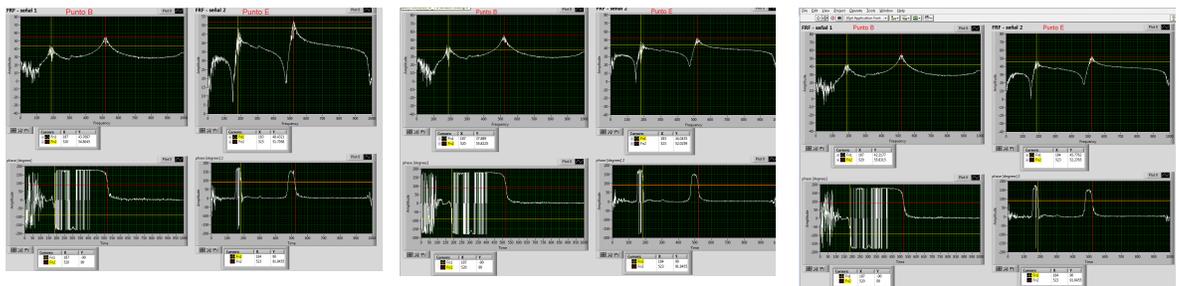
Espectro. 4: Ensayo modal con barrido sinusoidal en eje- medición punto D



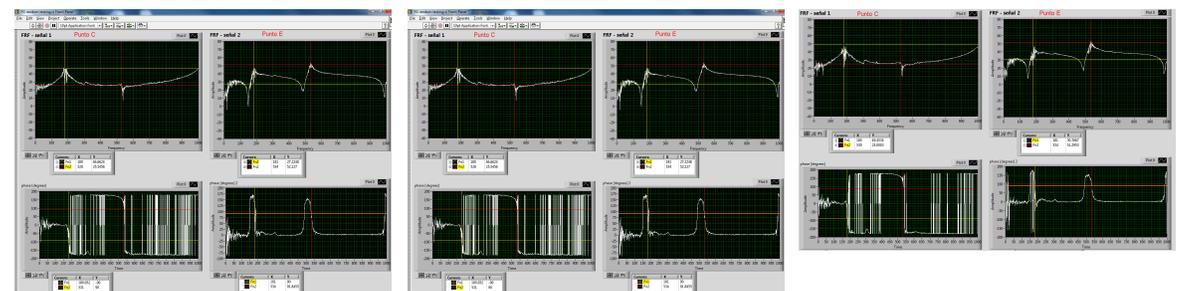
Espectro. 5: Ensayo modal con excitación aleatoria en eje- medición punto A y E



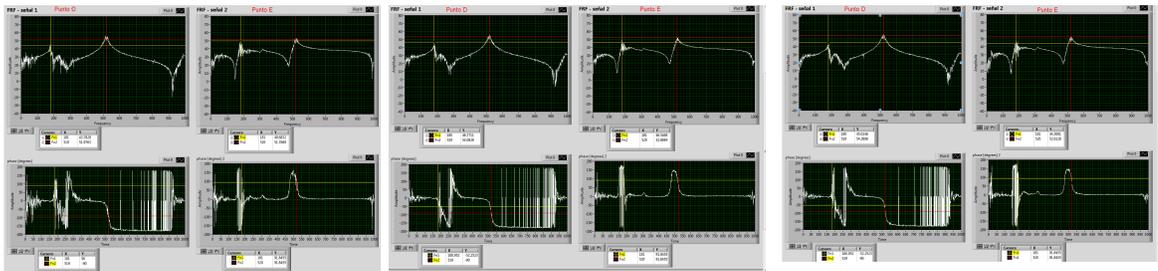
Espectro. 6: Ensayo modal con excitación aleatoria en eje- medición punto B y E



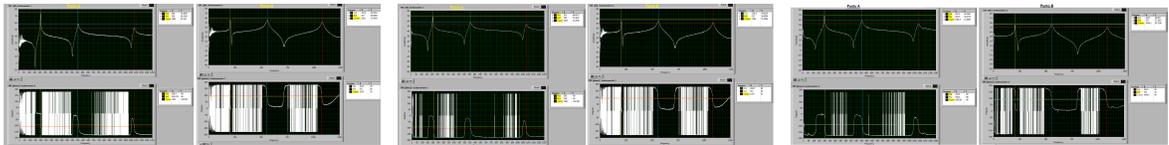
Espectro. 7: Ensayo modal con excitación aleatoria en eje- medición punto C y E



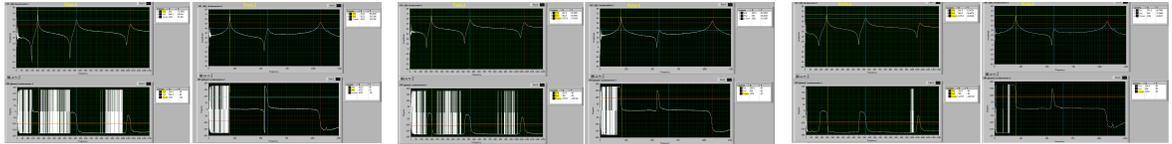
Espectro. 8: Ensayo modal con excitación aleatoria en eje- medición punto D y E



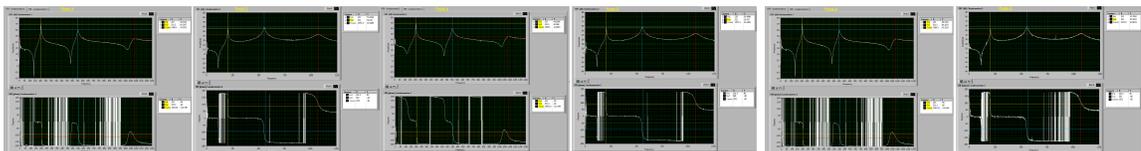
Espectro. 9: Ensayo modal de impacto en eje- Golpe en el punto A, mediciones en A y B



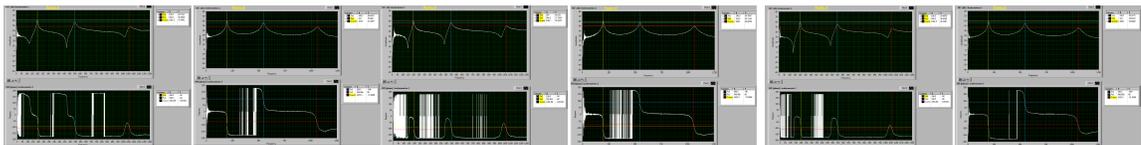
Espectro. 10: Ensayo modal de impacto en eje- Golpe en el punto A, mediciones en A y C



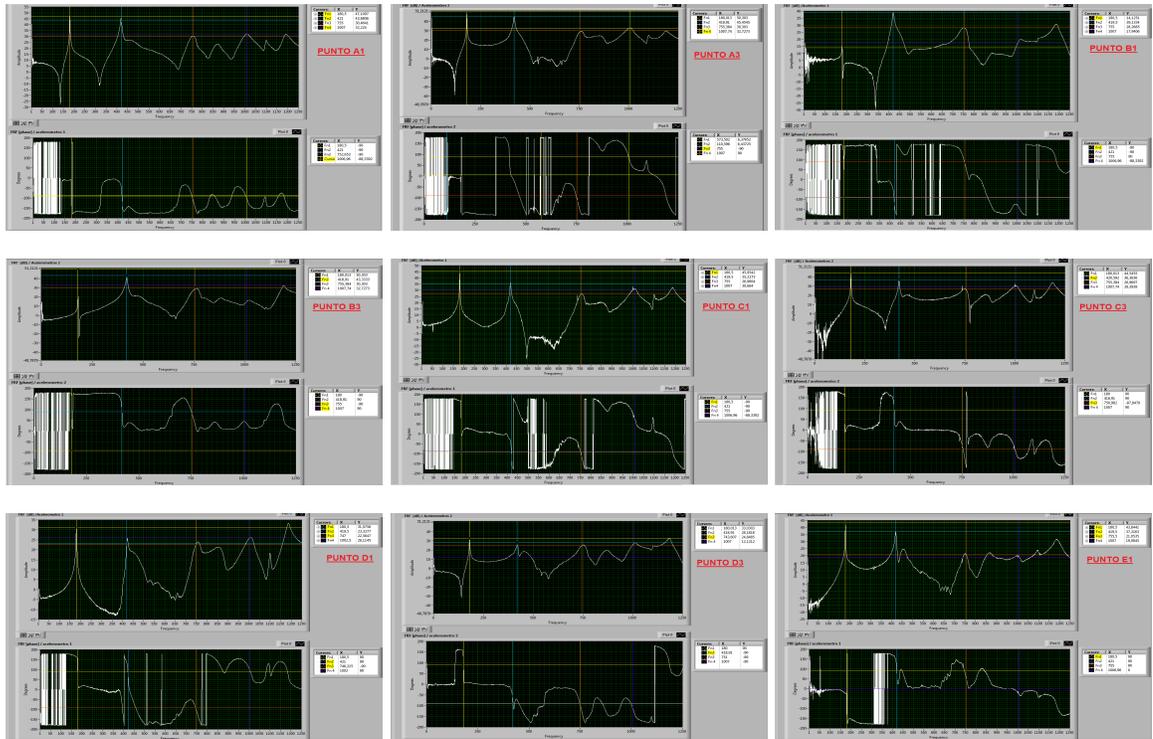
Espectro. 11: Ensayo modal de impacto en eje- Golpe en el punto A, mediciones en A y D



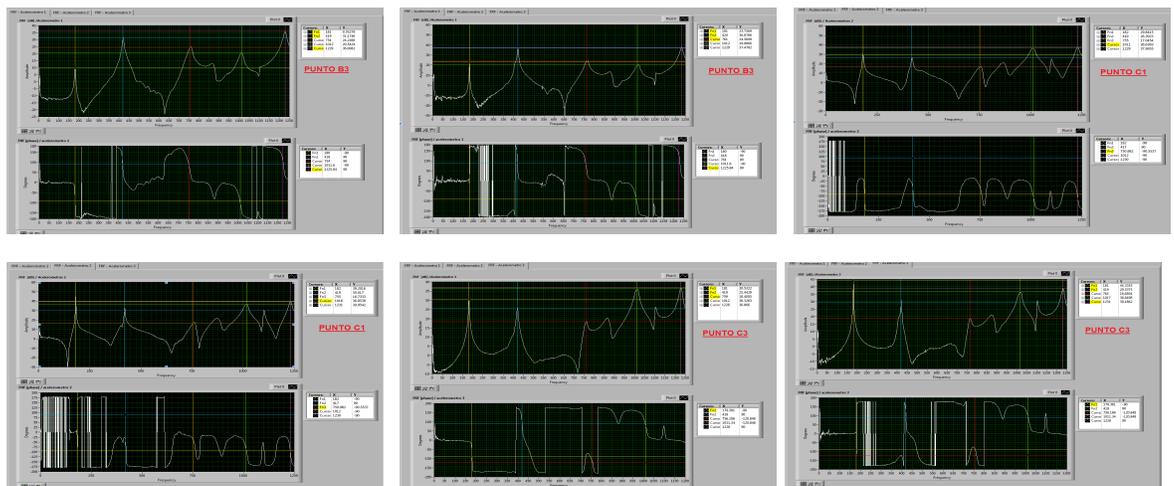
Espectro. 12: Ensayo modal de impacto en eje- Golpe en el punto A, mediciones en A y E



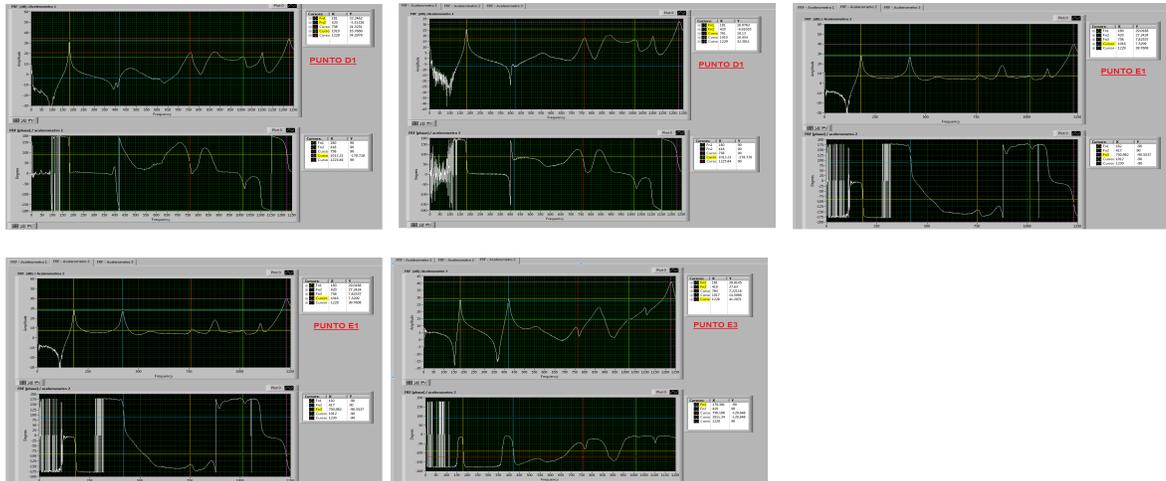
Espectro. 13: Ensayo modal de impacto en Placa con Motor- Golpe punto A1



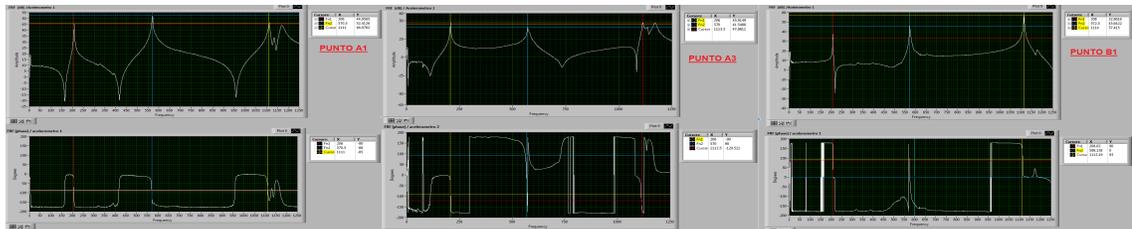
Espectro. 14: Ensayo modal de impacto en Placa con Motor- Golpe punto C1



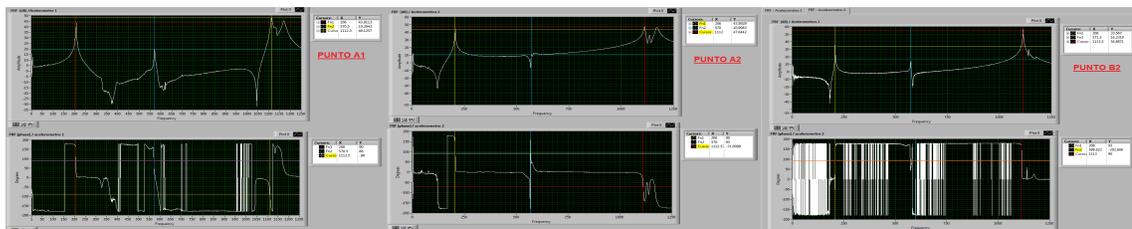
Espectro. 15: Ensayo modal de impacto en Placa con Motor- Golpe punto E3



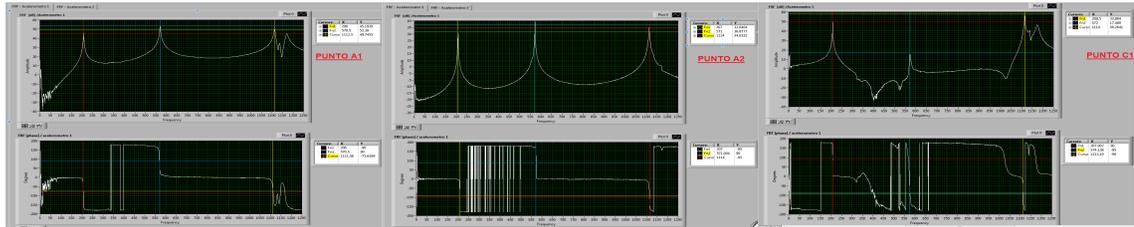
Espectro. 16: Ensayo modal de impacto en Placa - Golpe punto A1



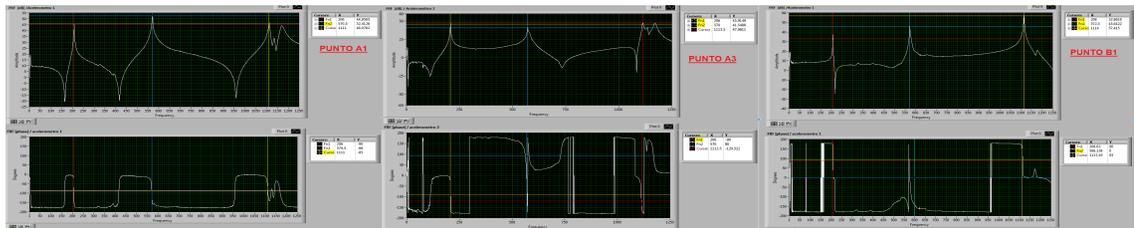
Espectro. 17: Ensayo modal de impacto en Placa - Golpe punto C1



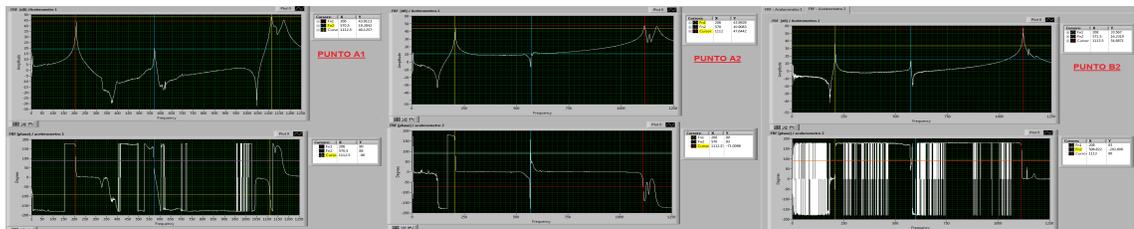
Espectro. 18: Ensayo modal de impacto en Placa - Golpe punto E1



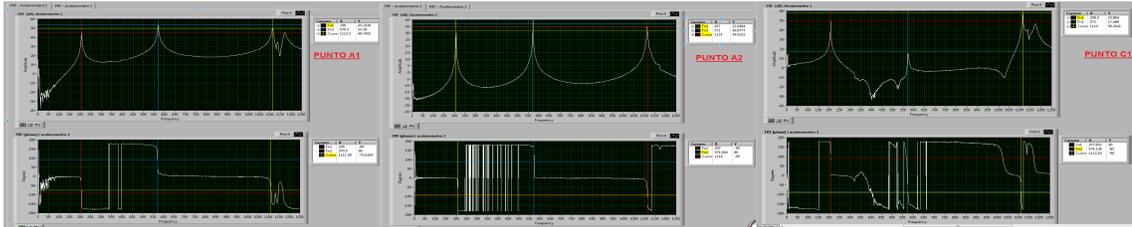
Espectro. 19: Ensayo modal de impacto en Placa - Golpe punto A1



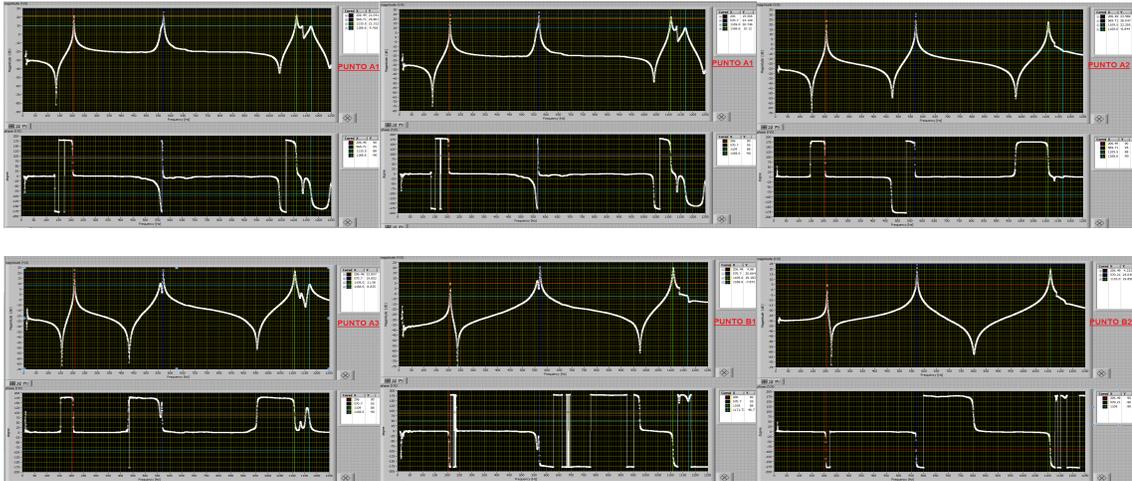
Espectro. 20: Ensayo modal de impacto en Placa - Golpe punto C1



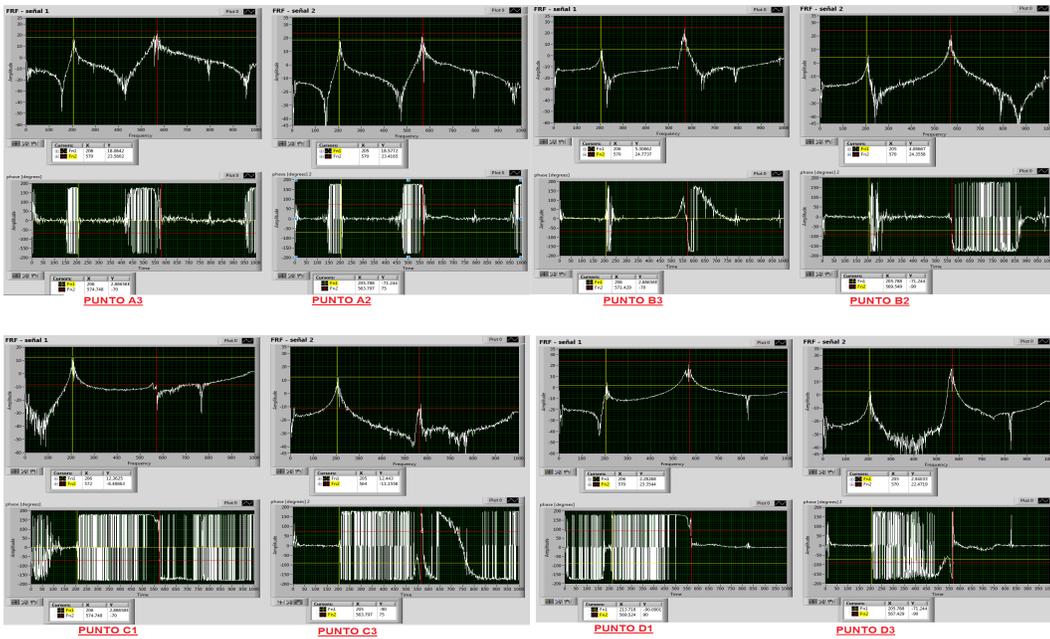
Espectro. 21: Ensayo modal de impacto en Placa - Golpe punto E1



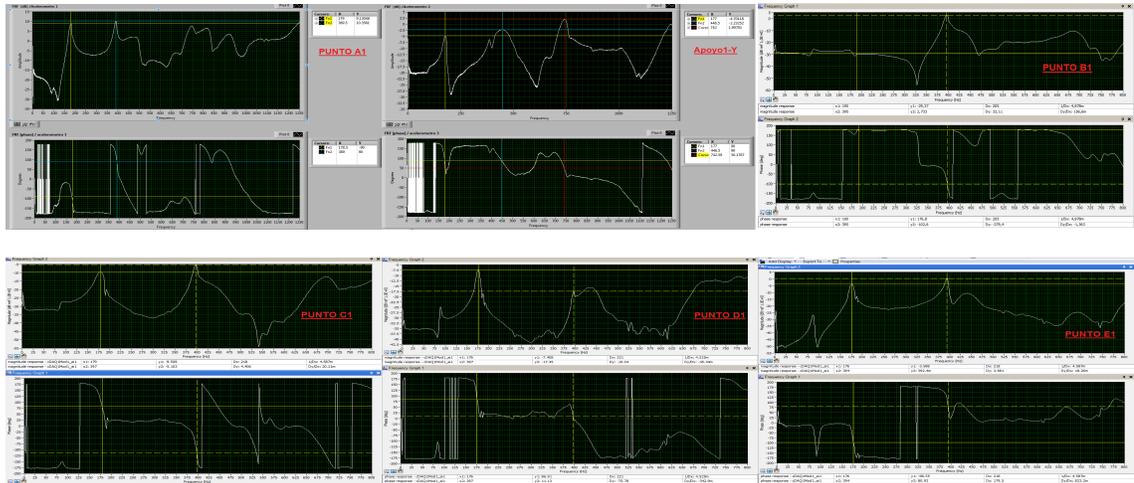
Espectro. 22: Ensayo modal con barrido sinusoidal en placa



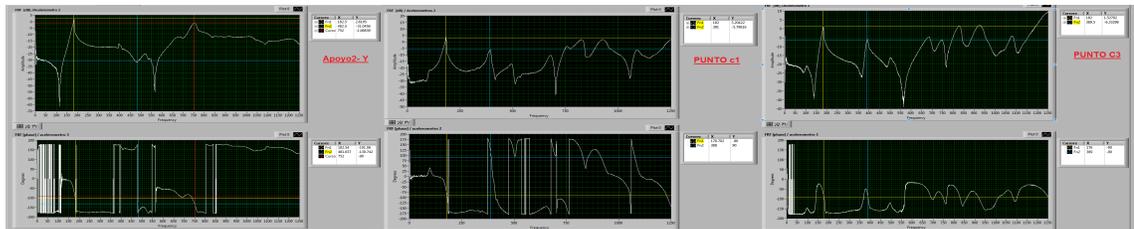
Espectro. 23: Ensayo modal con excitación aleatoria en Placa



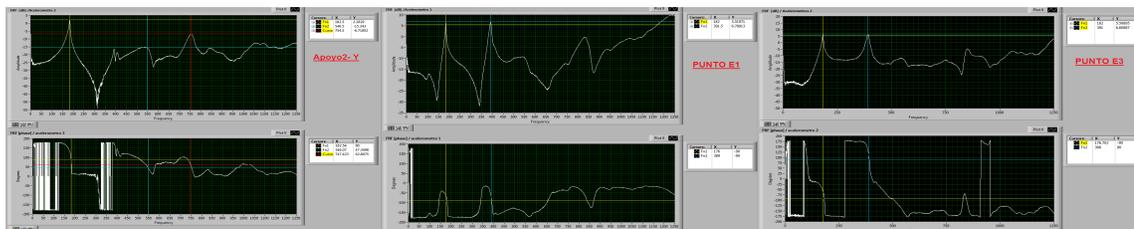
Espectro. 24: Ensayo modal de impacto en Rotorkit - Golpe punto A1



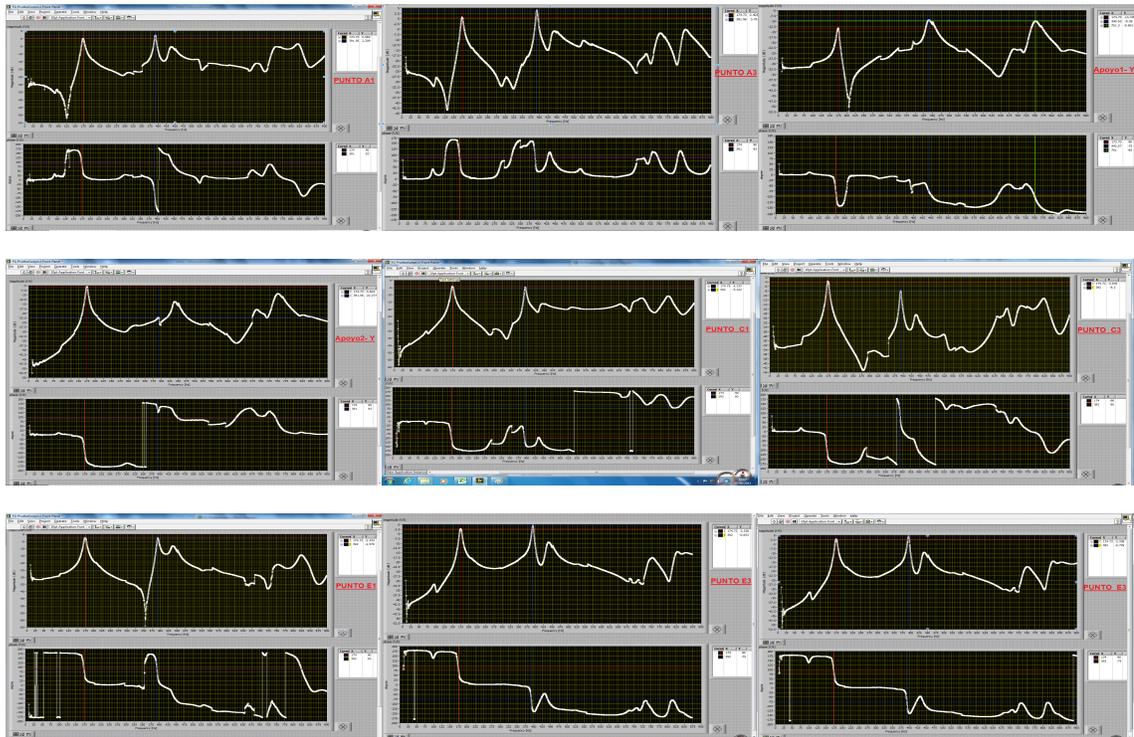
Espectro. 25: Ensayo modal de impacto en Rotorkit - Golpe punto C3



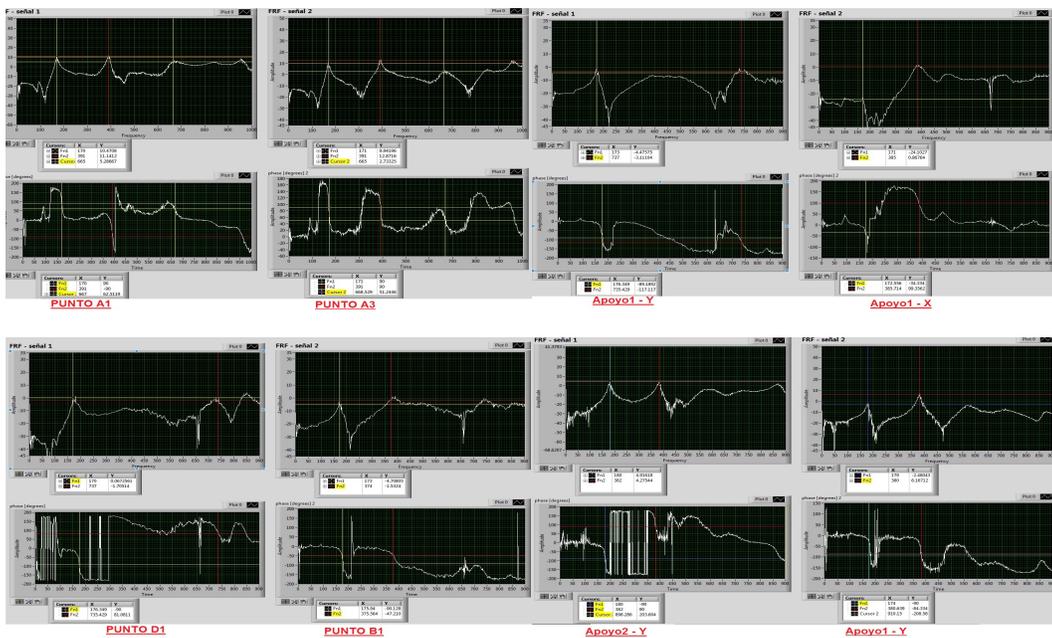
Espectro. 26: Ensayo modal de impacto en Rotorkit - Golpe punto E1



Espectro. 27: Ensayo modal con barrido sinusoidal en Rotorkit



Espectro. 28: Ensayo modal con excitación aleatoria en Rotokit



ANEXO E

BASE DE DATOS EMA - EXCEL

Ensayo modal de impacto en el eje - Montaje 2 -								
Ubicación Acelerómetros	Medición	Picos de Frecuencias						
		Pico 1	Fase 1	Pico 2	Fase 2	Pico 3	Fase 3	
Configuración 1 (Golpe punto A)	Punto A	Prueba1	204,5	0	556,5	0	1085,5	0
		Prueba2	205	0	556	0	1082	0
		Prueba3	205	0	556	0	1082	0
		Prueba4	204	0	559	0	1092	0
		Prueba5	204	0	559	0	1092	0
		Prueba6	204	0	559	0	1092	0
		Prueba7	204	0	559	0	1092	0
		Prueba8	204	0	559	0	1092	0
		Prueba9	204	0	559	0	1092	0
		Prueba10	204	0	559	0	1092	0
	Punto B	Prueba1	204,5	180	557	180	1081	180
		Prueba2	204,5	180	557	180	1081	180
		Prueba3	204,5	180	557	180	1081	180
		Prueba4	204	180	554	180	1086	180
		Prueba5	204	180	554	180	1086	180
		Prueba6	204	180	554	180	1086	180
		Prueba7	204	180	554	180	1086	180
		Prueba8	204	180	554	180	1086	180
		Prueba9	204	180	554	180	1086	180
		Prueba10	204	180	554	180	1086	180

NOTA:

 : Para los casos donde el punto de medición corresponde un nodo, en las tablas.

Ensayo modal de impacto en eje - Montaje 2° -								
Ubicación acelerómetros	Medición	Picos de Frecuencias						
		Pico 1	Fase 1	Pico 2	Fase 2	Pico 3	Fase 3	
Configuración 2 (Golpe punto A)	Punto A	Prueba1	201	0	564,5	0	1071	0
		Prueba2	201,5	0	565,5	0	1075,5	0
		Prueba3	201,5	0	565,5	0	1075,5	0
		Prueba4	200	0	567	0	1084	0
		Prueba5	200	0	567	0	1084	0
		Prueba6	200	0	567	0	1084	0
		Prueba7	200	0	566	0	1084	0
		Prueba8	200	0	566	0	1084	0
		Prueba9	200	0	567	0	1084	0
		Prueba10	200	0	567	0	1084	0
	Punto C	Prueba1	201,5	180	563,5	180	1070	0
		Prueba2	201,5	180	565	180	1081	0
		Prueba3	201,5	180	565	180	1081	0
		Prueba4	200	180	564	180	1084	0
		Prueba5	200	180	564	180	1084	0
		Prueba6	200	180	564	180	1084	0
		Prueba7	200	180	564	180	1084	0
		Prueba8	200	180	564	180	1082	0
		Prueba9	200	180	564	180	1082	0
		Prueba10	200	180	564	180	1082	0

Ensayo modal de impacto en eje - Montaje 2° -								
Ubicación acelerómetros	Medición	Picos de Frecuencias						
		Pico 1	Fase 1	Pico 2	Fase 2	Pico 3	Fase 3	
Configuración 3 (Golpe punto A)	Punto A	Prueba1	203	0	551,5	0	1080,5	0
		Prueba2	203	0	551,5	0	1080,5	0
		Prueba3	203	0	551,5	0	1080,5	0
		Prueba4	203	0	555	0	1089	0
		Prueba5	203	0	555	0	1089	0
		Prueba6	203	0	555	0	1089	0
		Prueba7	203	0	555	0	1089	0
		Prueba8	203	0	555	0	1089	0
		Prueba9	203	0	555	0	1089	0
		Prueba10	203	0	555	0	1090	0
	Punto D	Prueba1	203	180	552	0	1071,5	180
		Prueba2	203	180	552	0	1071,5	180
		Prueba3	203	180	552	0	1071,5	180
		Prueba4	203	180	556	0	1087	180
		Prueba5	203	180	556	0	1087	180
		Prueba6	203	180	556	0	1087	180
		Prueba7	203	180	556	0	1087	180
		Prueba8	203	180	556	0	1087	180
		Prueba9	203	180	556	0	1087	180
		Prueba10	203	180	556	0	1087	180

Ensayo modal de impacto en eje - Montaje 2° -								
Ubicación acelerómetros	Medición	Picos de Frecuencias						
		Pico 1	Fase 1	Pico 2	Fase 2	Pico 3	Fase 3	
Configuración 4 (Golpe punto A)	Punto A	Prueba1	196,5	0	546,5	0	1061,5	0
		Prueba2	196,5	0	546,5	0	1061,5	0
		Prueba3	195	0	546,5	0	1063	0
		Prueba4	197	0	542	0	1060	0
		Prueba5	197	0	542	0	1060	0
		Prueba6	197	0	542	0	1060	0
		Prueba7	197	0	542	0	1060	0
		Prueba8	197	0	542	0	1060	0
		Prueba9	197	0	542	0	1060	0
		Prueba10	197	0	542	0	1060	0
	Punto E	Prueba1	196,5	0	547	180	1055	0
		Prueba2	196,5	0	547	180	1055	0
		Prueba3	196,5	0	545,5	180	1060	0
		Prueba4	196	0	543	180	1055	0
		Prueba5	196	0	543	180	1055	0
		Prueba6	196	0	543	180	1055	0
		Prueba7	196	0	543	180	1055	0
		Prueba8	196	0	543	180	1055	0
		Prueba9	196	0	543	180	1055	0
		Prueba10	196	0	543	180	1055	0

TOTAL	Promedio	201,01	554,95	1077,66
	número datos	80,00	80,00	80,00
	Desviación Estándar	3,03	7,91	12,44
	Error	0,66	1,73	2,73
	Valor crítico Inferior	200,35	553,22	1074,93
	Valor crítico superior	201,68	556,68	1080,38

**Ensayo modal con barrido sinusoidal en eje
- Montaje 1° -**

Ubicación acelerómetros	Medición	Picos de Frecuencias					
		Pico 1	Fase 1	Pico 2	Fase 2	Pico 3	Fase 3
Punto A	1	176,72	180	505,7	0	1022,74	180
	2	174,21	180	505,7	0	1022,7	180
	3	176,7	180	505,7	0	1022,7	180
	4	176,7	180	505,7	0	1022,7	180
	5	173,25	180	505,7	0	1022,74	180
	6	173,25	180	505,7	0	1022,74	180
Punto B	1	187,14	0	516,62	180	1046,6	0
	2	187,14	0	516,62	180	1046,6	0
	3	187,14	0	516,62	180	1046,6	0
	4	187,14	0	516,62	180	1046,6	0
	5	187,14	0	516,62	180	1046,6	0
Punto C	1	183,17	0	531,5	180	1035,1	180
	2	178,71	0	531,5	180	1035,1	180
	3	178,71	0	531,5	180	1035,1	180
	4	178,71	0	531,5	180	1035,1	180
	5	178,71	0	531,5	180	1035,1	180
Punto D	1	185,65	0	518,6	0	1056,48	0
	2	183,17	0	520,6	0	1056,5	0
	3	182,68	0	519,5	0	1055,5	0
	4	185,6	0	518,6	0	1056,48	0

TOTAL	Promedio (Hz)	181,08	517,61
	numero de datos	20	20
	Desviación estándar (Hz)	5,06	9,83
	Error (Hz)	2,36	4,58
	Valor crítico inferior (Hz)	178,72	513,02
	Valor crítico superior (Hz)	183,44	522,19

Ensayo modal con excitación aleatoria en el eje - Montaje 1° -						
	Ubicación acelerómetros	Medición	Picos de Frecuencias			
			Pico 1	Fase 1	Pico 2	Fase 2
Configuración 1	Punto A	Prueba1	176	180	504	0
		Prueba2	176	180	504	0
		Prueba3	174	180	504	0
	Punto E	Prueba1	177	180	503	180
		Prueba2	177	180	503	180
		Prueba3	177	180	503	180
Configuración 2	Punto B	Prueba1	187	0	520	180
		Prueba2	187	0	520	180
		Prueba3	187	0	523	180
	Punto E	Prueba1	184	180	523	180
		Prueba2	183	180	523	180
		Prueba3	183	180	523	180
Configuración 3	Punto C	Prueba1	180	0	528	180
		Prueba2	180	0	528	180
		Prueba3	180	0	530	180
	Punto E	Prueba1	180	180	534	180
		Prueba2	181	180	534	180
		Prueba3	181	180	534	180
Configuración 4	Punto D	Prueba1	180	0	519	0
		Prueba2	181	0	519	0
		Prueba3	180	0	519	0
	Punto E	Prueba1	181	180	520	180
		Prueba2	181	180	520	180
		Prueba3	181	180	520	180

TOTAL	Promedio (Hz)	180,58	519,08
	numero de datos	24	24
	Desviación estándar (Hz)	3,45	10,36
	Error (Hz)	1,45	4,35
	Valor crítico inferior (Hz)	179,14	514,73
	Valor crítico superior (Hz)	182,03	523,43

Ensayo modal de impacto en placa							
	Ubicación acelerómetros	Picos de Frecuencias					
		Pico 1	Fase 1	Pico 2	Fase 2	Pico 3	Fase 3
Golpe en A1	A1	206	0	570,5	0	1111	0
	A3	206	0	570	0	1113,5	0
	B1	208	180	572,5	180	1114	180
	B2	208	180	571,5	180	1113,5	180
Golpe en B1	A1	206	180	570,5	180	1112,5	180
	A3	206	180	570	180	1113,5	180
	B1	208	180	572,5	0	1114	0
	B2	208	180	571,5	0	1113,5	0
Golpe en C1	A1	206	180			1112,5	0
	A2	206	180			1112	0
	B1	208	0			1114	180
	B2	208	0			1113,5	180
	C1	208,8	0			1114	0
	C2	208	0			1113,5	0
Golpe en D1	A1	207	180	571	0	1114	180
	A2	206	180	570	0	1112	180
	C1	208	0			1114	180
	C2	208	0			1113,5	180
Golpe en E1	A1	206	0	570,5	180	1112,5	0
	A2	207	0	571	180	1114	0
	C1	209,5	0			1114	0
	C2	208	0			1113,5	0

TOTAL	Promedio (Hz)	207,29	570,96	1113,30
	numero de datos	22	12	22
	Desviación estándar (Hz)	1,11	0,898	0,84
	Error (Hz)	0,49	0,538	0,37
	Valor crítico inferior (Hz)	206,80	570,428	1112,92
	Valor crítico superior (Hz)	207,78	571,498	1113,68

Ensayo modal con barrido sinusoidal en placa								
Ubicación acelerómetros	Medición	Picos de Frecuencias						
		Pico 1	Fase 1	Pico 2	Fase 2	Pico 3	Fase 3	
Excitación A3	A1	Prueba1	206,49	180	569,71	180	1110,5	180
	A1	Prueba2	206	180	570,7	180	1109	180
	A1	Prueba3	206,49	180	569,71	180	1109,5	180
	A2	Prueba1	206,49	180	569,71	180	1109,5	180
	A2	Prueba2	207,95	180	570,46	180	1112,44	180
	A2	Prueba3	207,95	180	570,46	180	1112,44	180
	A3	Prueba1	206,49	180	570,7	180	1109	180
	A3	Prueba2	206,49	180	570,7	180	1109	180
	A3	Prueba3	206,49	180	570,7	180	1109	180
	B1	Prueba1	206,49	0	570,7	0	1109	0
	B1	Prueba2	206,49	0	570,7	0	1109	0
	B1	Prueba3	206,99	0	570,7	0	1109,5	0
	B2	Prueba1	206,49	0	570,21	0	1110	0
	B2	Prueba2	206,49	0	570,21	0	1110	0
	B2	Prueba3	206	0	569,71	0	1110	0
	C1	Prueba1	206,99	0	570,21		1109	180
	C1	Prueba2	206,49	0	570,7		1109	180
	C1	Prueba3	206,49	0	570,7		1109	180
	C2	Prueba1	206,49	0	570,21		1109,5	180
	C2	Prueba2	206,49	0	570,21		1109	180
	C2	Prueba3	206,49	0	570,21		1109	180

TOTAL	Promedio (Hz)	206,63	570,35	1109,64
	numero de datos	21	21	21
	Desviación estándar (Hz)	0,49	0,38	1,034
	Error (Hz)	0,22	0,17	0,47
	Valor crítico inferior (Hz)	206,41	570,18	1109,17
	Valor crítico superior (Hz)	206,85	570,52	1110,11

Ensayo modal con excitación aleatoria en placa					
	Ubicación acelerómetros	Picos de Frecuencias			
		Pico 1	Fase 1	Pico 2	Fase 2
Excitación A3	A3	206	180	570	180
	A2	205	180	570	180
	B3	206	0	570	0
	B2	205	0	570	0
	C1	206	0	572	180
	C3	205	0	564	180
	D1	206	0	570	180
	D3	205	0	570	180
	E1	206	180	565	0
	E2	205	180	570	0

TOTAL	Promedio (Hz)	205,50	569,10
	numero de datos	10,00	10,00
	Desviación estándar (Hz)	0,53	2,51
	Error (Hz)	0,37	1,77
	Valor crítico inferior (Hz)	205,13	567,33
	Valor crítico superior (Hz)	205,87	570,87

Ensayo modal de impacto en placa con motor									
Ubicación acelerómetros	Picos de Frecuencias								
	Pico 1	Fase 1	Pico 2	Fase 2	Pico 3	Fase 3	Pico 4	Fase 4	
golpe en A1	A1	181	0	419	0	754	0	1012	0
	A1	181	0	419	0	754	0	1012	0
	A3	182	0	417	180	755	0	1012	180
	A3	182	0	419	180	755	0	1011	180
	B1			419	0	750	180		
	B1			419	0	753	180		
	A1	180,5	0	421	0	755	0	1007	0
	A1	180,5	0	419,5	0	755	0	1007	0
	A3	180,5	0	419	180	755	0	1007	180
	A3	180,5	0	418,91	180	755	0	1007	180
	B1			419,5	0	755	180		
	B1			419,5	0	755	180		
	B3			418,91	180	755,4	180		
	B3			418,91	180	755,38	180		
	C1	180,5	180	419,5	0	755	0	1007	180
	C1	180,5	180	419,5	0	755	0	1007	180
	C3	180,33	180	420	180	752	0	1010	0
	C3	180	180	420,6	180	757,1	0	1007	0
	D1	180,5	180	419,5	180	747	0	1003	180
	D1	180,5	180	419	180	747	0	1002	180
	D3	180,5	180	418,9	0	750	0	1007	0
	D3	180,5	180	422,5	0	748,5	0	1007	0
	E1	180,5	0	419,5	180	755,5	180		
	E1	180,5	0	419,5	180	755,5	180		
E3	180,13	0	420,6	0	751	180			
E3	180	0	420,6	0	751	180			

TOTAL	Promedio (Hz)	180,76	419,44	753,95	1009,32
	numero de datos	32,00	36,00	32,00	22,00
	Desviación estándar (Hz)	0,58	0,88	3,29	3,75
	Error (Hz)	0,21	0,30	1,19	1,66
	Valor crítico inferior (Hz)	180,56	419,15	752,76	1007,66
	Valor crítico superior (Hz)	180,97	419,74	755,14	1010,97

Ensayo modal de impacto en rotorkit					
Ubicación acelerómetros	Picos de Frecuencias				
	Pico 1	Fase 1	Pico 2	Fase 2	
Golpe en A1	A1	179	0	385	180
	A1	176	0	389,5	180
	A1	179	0	389,5	180
	A1	179	0	385	180
	A1	176	0	389,5	180
	A1	179	0	389,5	180
	A1	179	0	389,5	180
	A3	182	0	388	0
	A3	177	0	388	0
	A3	180	0	388	0
	A3	182	0	388	0
	A3	177	0	388	0
	A3	177	0	388	0
	A3	180	0	388	0
	C1	181,5	180	398,5	0
	C1	180,5	180	398,5	0
	C1	177	180	398,5	0
	C1	177	180	398,5	0
	C1	179	180	397	0
	C1	179	180	397	0
	C1	179	180	397	0
	C1	179	180	397	0
	C3	180	180	395	180
	C3	180	180	395	180
	C3	180	180	395	180
	C3	181,5	180	392,9	180
	C3	183,5	180	396,1	180
	C3	178,6	180	396	180
	C3	178,6	180	396	180
	C3	180	180	395	180

Ensayo modal de impacto en rotorkit					
Ubicación acelerómetros	Picos de Frecuencias				
	Pico 1	Fase 1	Pico 2	Fase 2	
Golpe en A1	E1	176	0	394	180
	E1	176	0	391	180
	E1	176	0	393	180
	E1	176	0	394	180
	E2	176	0		
	E2	176	0		
	E2	176	0		
	E2	176	0		
	E3	175	0	395	0
	E3	175	0	394	0
	E3	175	0	394	0
	E3	175	0	394	0
	D1	178	180		
	D1	178	180		
	D1	178	180		
	D1	178	180		
	D2	177	180		
	D2	177	180		
	D2	177	180		
	D2	177	180		
	Ap1y	177	180		
	Ap1y	177	180		
	Ap1y	177	180		
	Ap1y	177	180		
	Ap1y	177	180		
	Ap1y	177	180		
	Ap1y	177	180		
	Ap1y	177	180		
	Ap2y	177	180		
	Ap2y	177	180		
Ap2y	177	180			
Ap2y	177	180			

Ensayo modal con impacto en rotorkit					
	Ubicación acelerómetros	Picos de Frecuencias			
		Pico 1	Fase 1	Pico 2	Fase 2
Golpe en C3	Ap2y	182,5	0		
	Ap2y	182,5	0		
	Ap2y	182,5	0		
	C1	182	0	388	180
	C1	182	0	391	180
	C1	182	0	391	180
	C3	182	0	389,5	0
	C3	182	0	389,5	0
	C3	182	0	389,5	0
Golpe en E1	Ap2y	182,5	180		
	Ap2y	182,5	180		
	E1	182	0	391,5	0
	E1	182	0	393	0
	E3	182	0	391	180
	E3	182	0	391	180

TOTAL	Promedio (Hz)	178,73	392,30
	numero de datos	76,00	48,00
	Desviación estándar (Hz)	2,43	3,75
	Error (Hz)	0,55	1,09
	Valor crítico inferior (Hz)	178,18	391,21
	Valor crítico superior (Hz)	179,29	393,40

Ensayo modal con excitación aleatoria en rotorkit				
Ubicación acelerómetros	Picos de Frecuencias			
	Pico 1	Fase 1	Pico 2	Fase 2
A1	180	180	390	0
A3	181	180	393	180
Ap1y	180	0	393	0
Ap2y	181	0	393	180
C1	180	0	393	0
C3	181	0	395	180
E1	180	180	393	180
E3	181	180	391	0
A1	177	180	390	0
A3	178	180	391	180
Ap1y	173	0		
Ap1x			385	180
Ap1z	173	0	374	180
Ap2z	172	180		
Ap2z	173	180		
Ap2y	175	0		
D1	170	0		
B1	173	0	385	0
A1	170	180	391	0
A3	171	180	391	180
Ap2x	180	0	382	0
Ap1x	183		394	180
Ap2y	180	0	382	180
Ap1y	179	0	380	0
Ap2z	180	0	389	
Ap1z	174	0	394	180
D1	181	0	377	180

TOTAL	Promedio (Hz)	177,15	388,45
	numero de datos	26,00	22,00
	Desviación estándar (Hz)	4,10	6,01
	Error (Hz)	1,65	2,66
	Valor crítico inferior (Hz)	175,50	385,80
	Valor crítico superior (Hz)	178,81	391,11

Ensayo modal con barrido sinusoidal en rotorkit				
Ubicación acelerómetros	Picos de Frecuencias			
	Pico 1	Fase 1	Pico 2	Fase 2
A1	174,73	180	391,56	0
A1	174,73	180	391,56	0
A1	174,73	180	391,56	0
A3	174,73	180	391,56	180
A3	174,73	180	391,56	180
A3	174,73	180	391,56	180
Ap1y	174,73	0		
Ap1y	174,73	0		
Ap1y	174,73	0		
Ap2y	174,73	0		
Ap2y	174,73	0		
Ap2y	174,73	0		
C1	174,73	0	392	0
C1	174,73	0	392	0
C1	174,73	0	392	0
C3	174,73	0	392	180
C3	174,73	0	392	180
C3	174,73	0	392	180
E1	174,73	180	392	180
E1	174,73	180	392	180
E1	174,73	180	392	180
E3	174,73	180	392	0
E3	174,73	180	392	0
E3	174,73	180	392	0

TOTAL	Promedio (Hz)	174,73	391,85
	numero de datos	22,00	18,00
	Desviación estándar (Hz)	0,00	0,21
	Error (Hz)	0,00	0,11
	Valor crítico inferior (Hz)	174,73	391,75
	Valor crítico superior (Hz)	174,73	391,96

ANEXO F
MONTAJE PARA OMA

Montajes para OMA en el eje

Montaje 1



El primer montaje OMA en el eje es el mismo primer montaje de EMA para el eje, con la diferencia que en OMA, el sensor fuerza acoplado al shaker no requiere estar conectado a tarjeta de adquisición de datos. Ya que no se está midiendo las señales de entrada al sistema.

Montaje 2



El segundo montaje del OMA en el eje, se realiza de forma similar a los ensayos modales, donde se requiera excitar la pieza por medio de una señal de impulso. Para estos ensayos modales OMA, se empleó un objeto metálico, con el cual se realizaron una serie de pequeños impactos.

Montajes para OMA en la placa



En los ensayos modales en OMA en la placa, al igual que para el eje, se utilizan los mismos equipos; el shaker, para excitación con señales periódicas y un objeto metálico, para excitación por una serie de impactos.

En la figura en la parte superior del texto, se observa la medición de realizada por 3 acelerómetros en los puntos A1, A2 y A3, en un ensayo modal OMA por medio de una serie de impactos en la placa

Montaje para OMA para placa con motor



Para la placa con motor y Rotorkit, los ensayos modales OMA se realizan con una fuente de excitación por parte del motor eléctrico de 1/10 Hp de Bentley Nevada. Esto se puede observar en las figuras que se encuentran arriba y debajo de este texto.

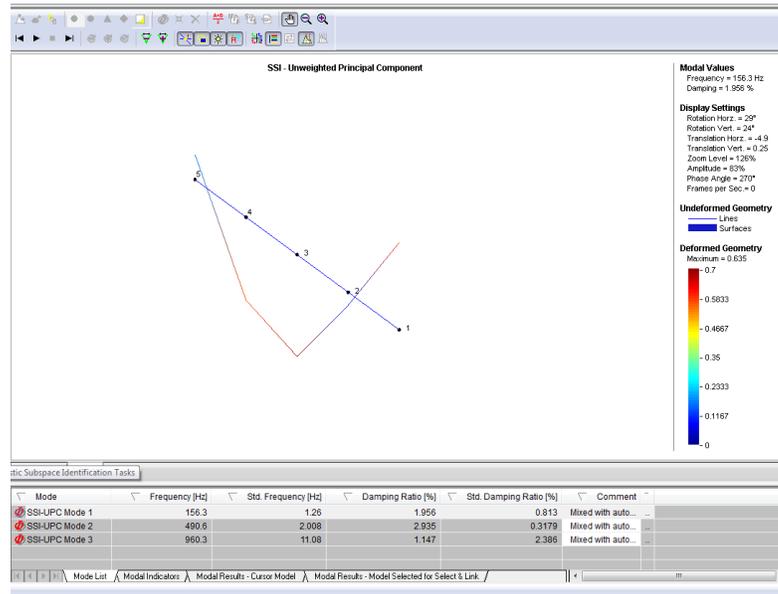
Montaje para OMA para Rotorkit



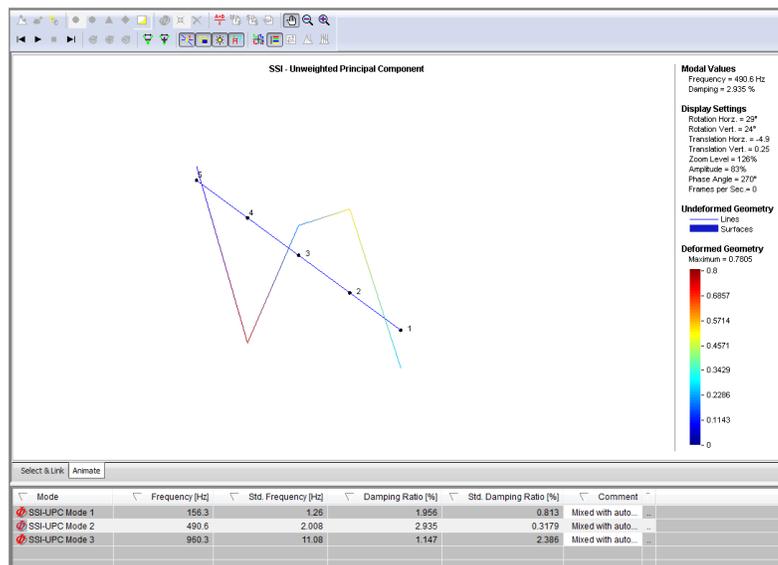
ANEXO G
RESULTADOS ARTeMIS
EXTRACTOR PRO

Resultados de análisis modal operacional en eje excitado con una señal sinusoidal a 50Hz

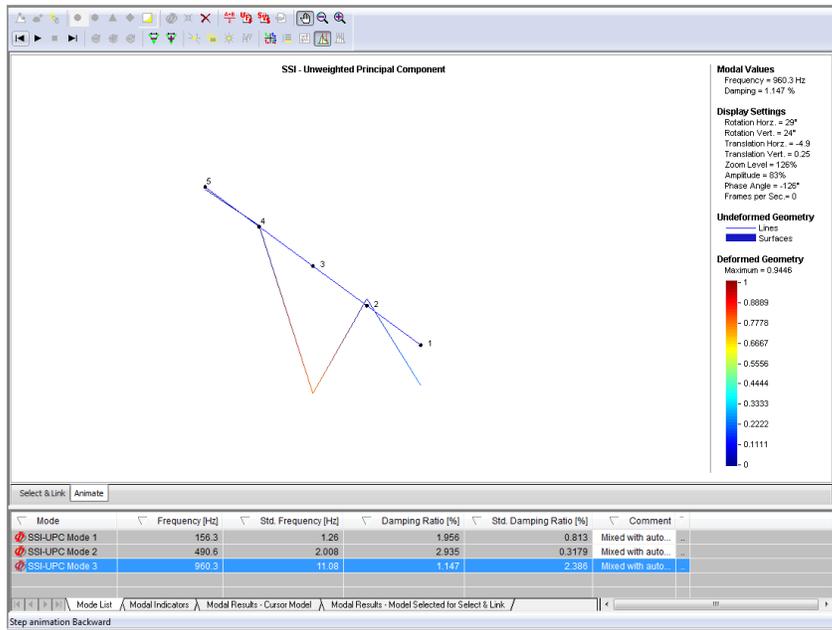
Resultados SSI-UPC



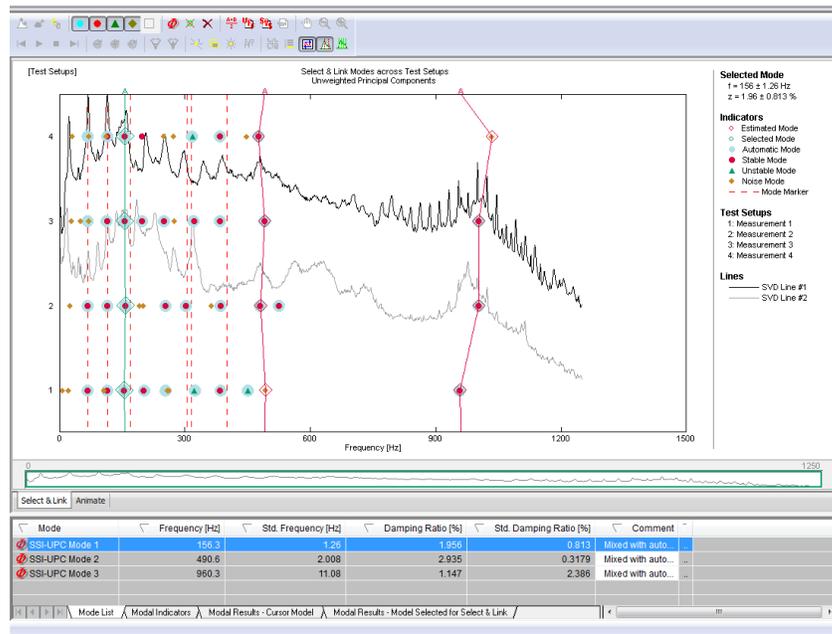
1 modo



2 modo

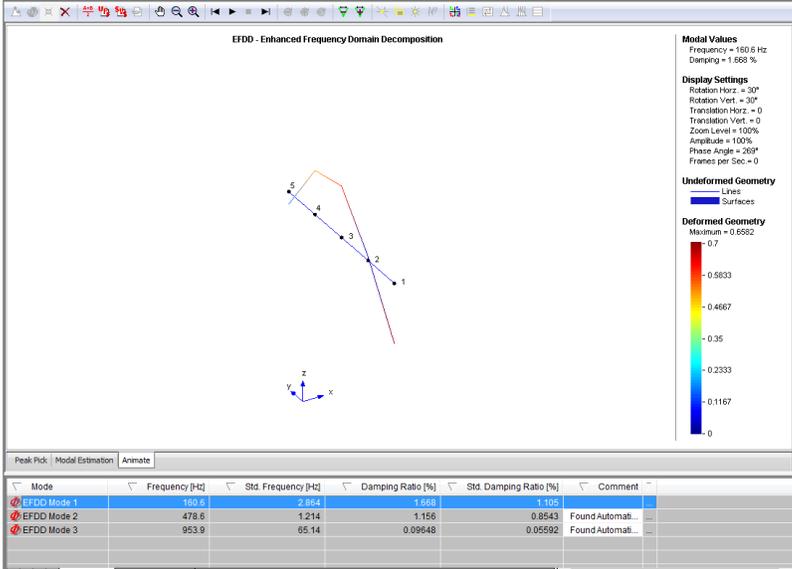


3 modo

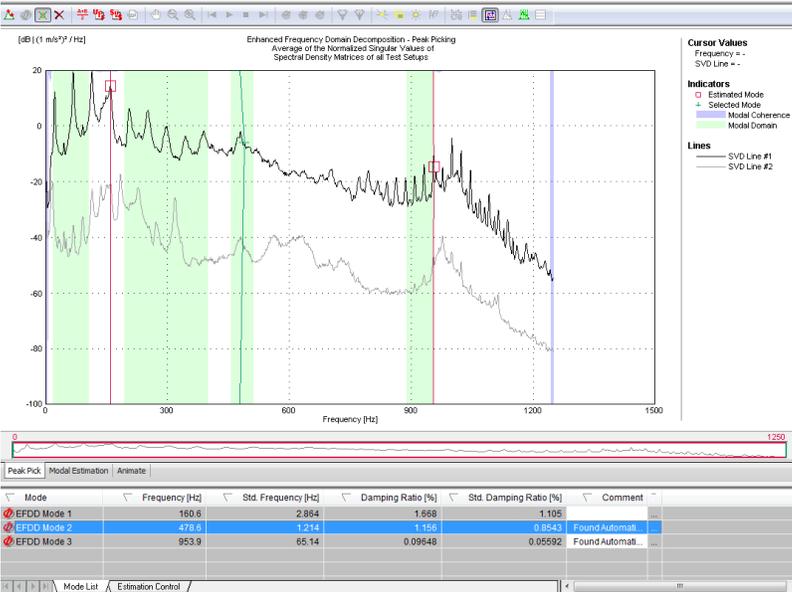


Espectro

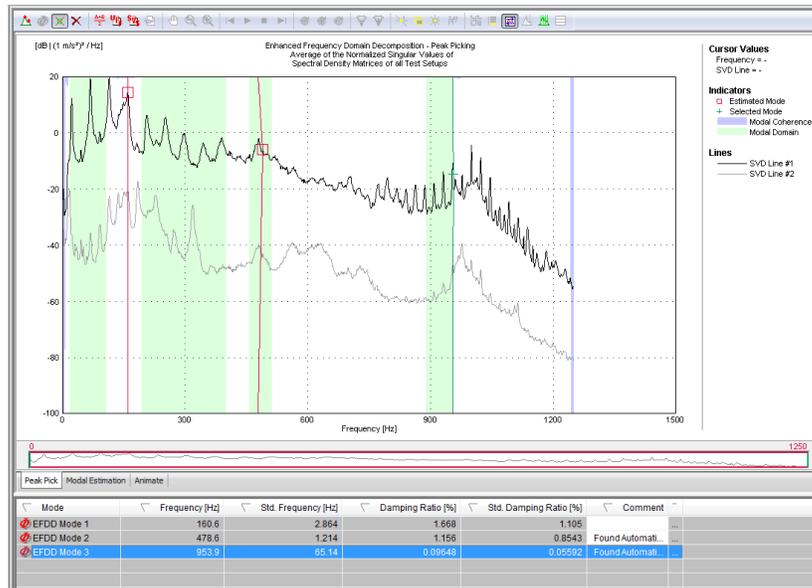
Resultados EFDD



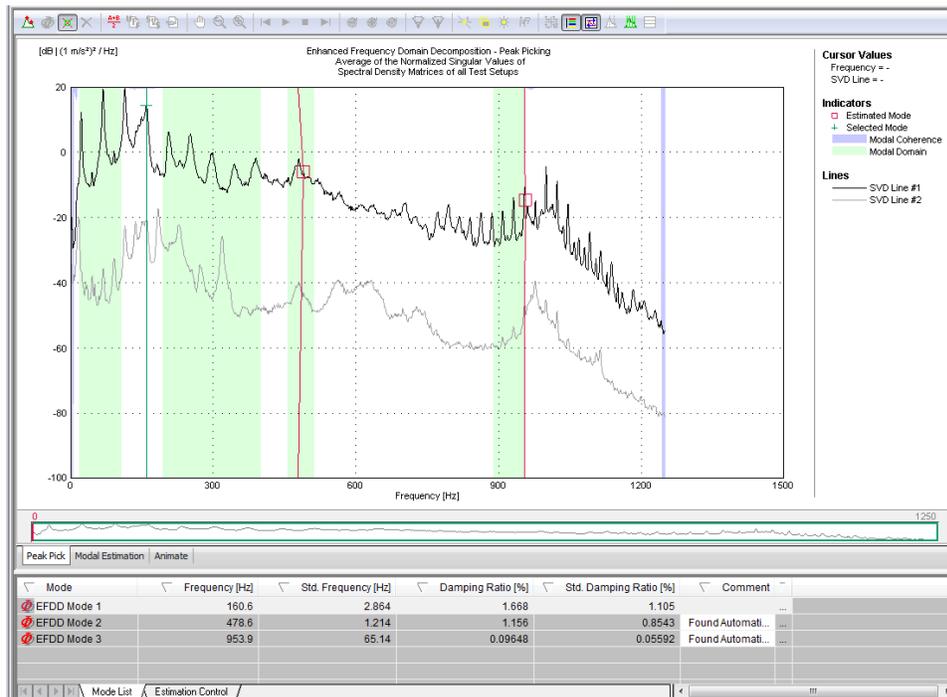
1 modo



2 modo



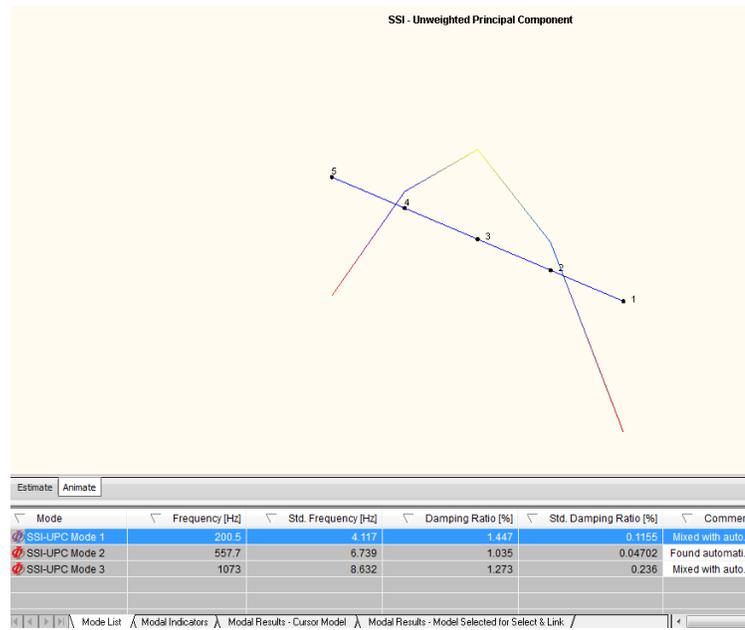
3 modo



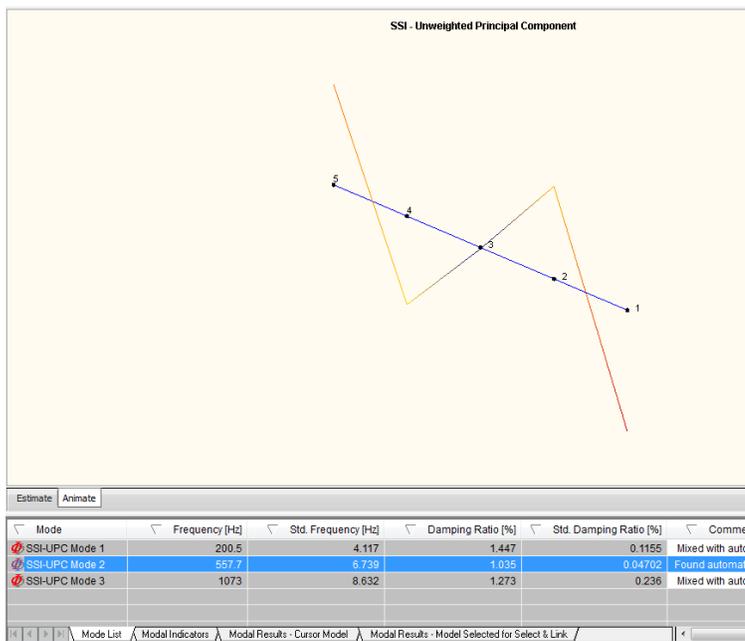
Espectro

Resultados de análisis modal operacional en eje excitado por una serie de impactos.

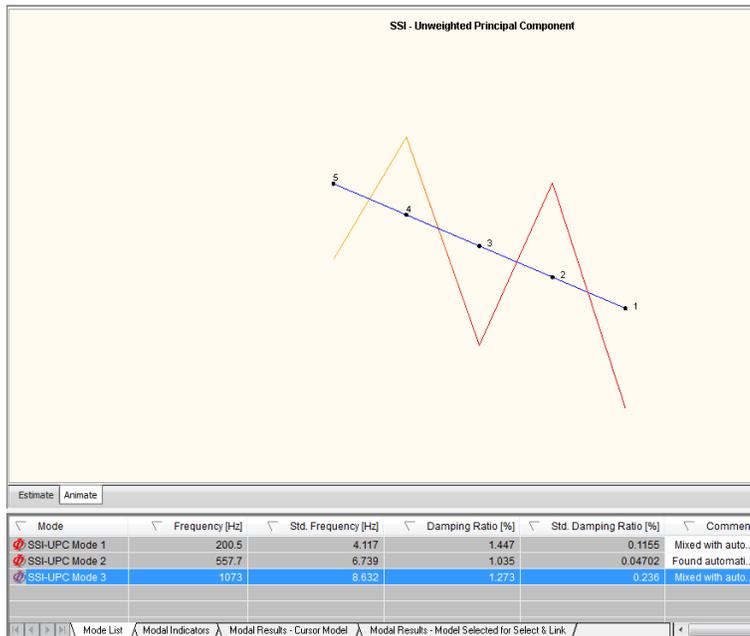
Resultados SSI-UPC



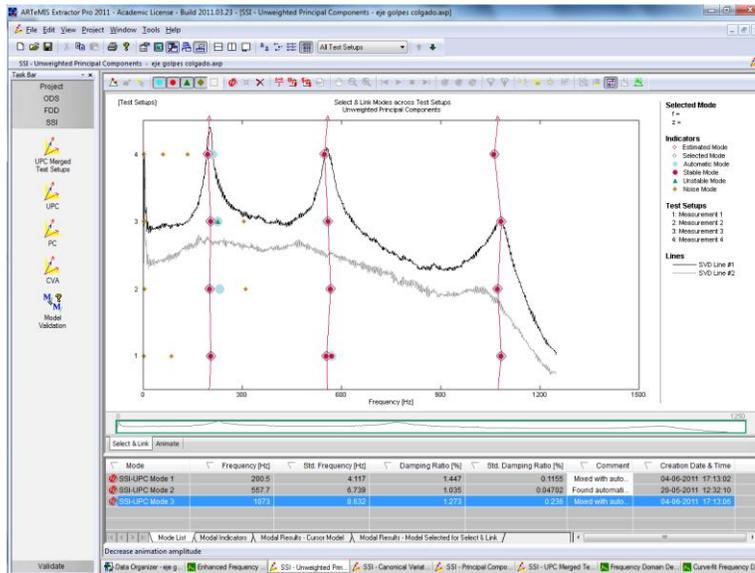
1 modo



2 modo

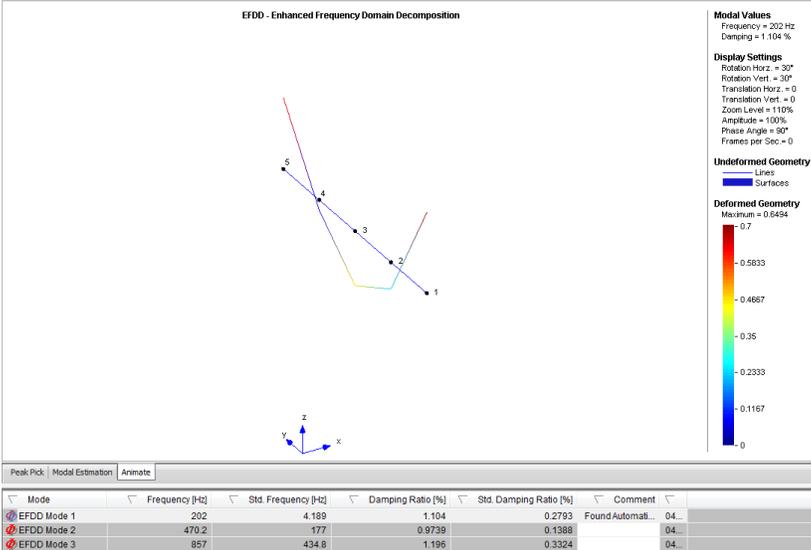


3 modo

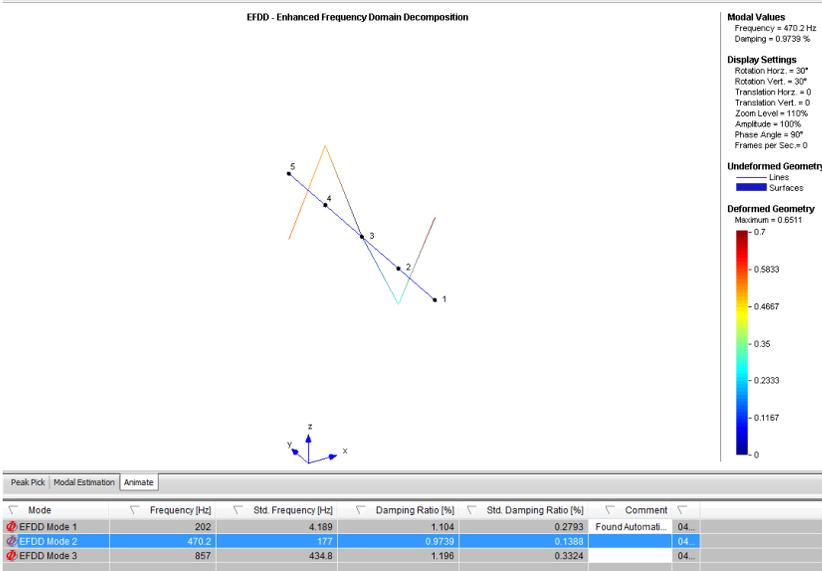


Espectro

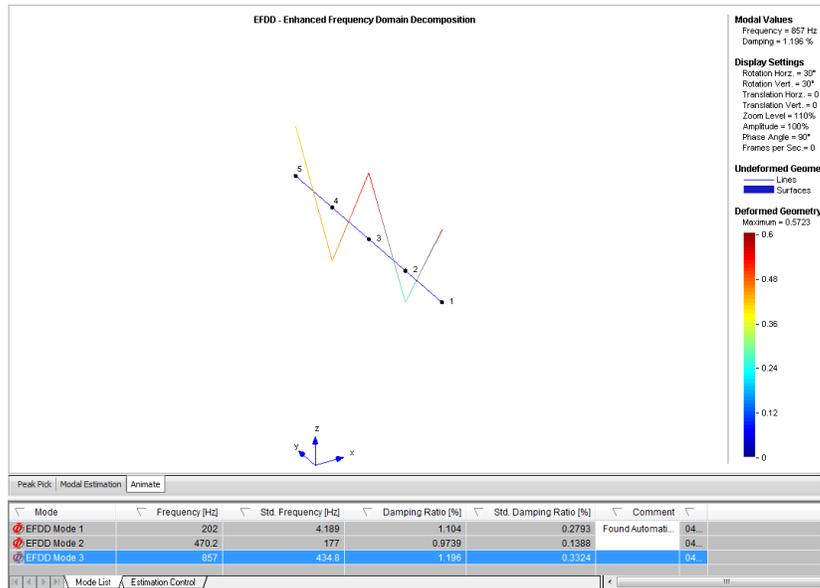
Resultados EFDD



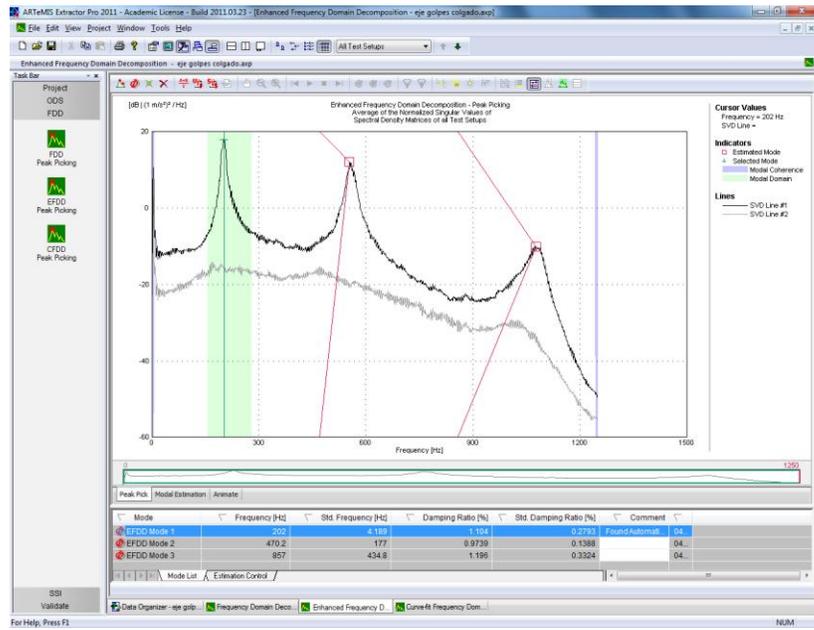
1 modo



2 modo



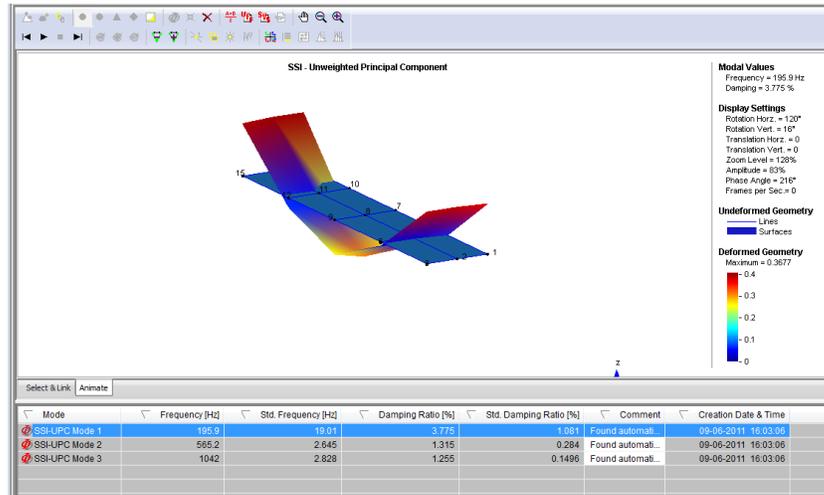
3 modo



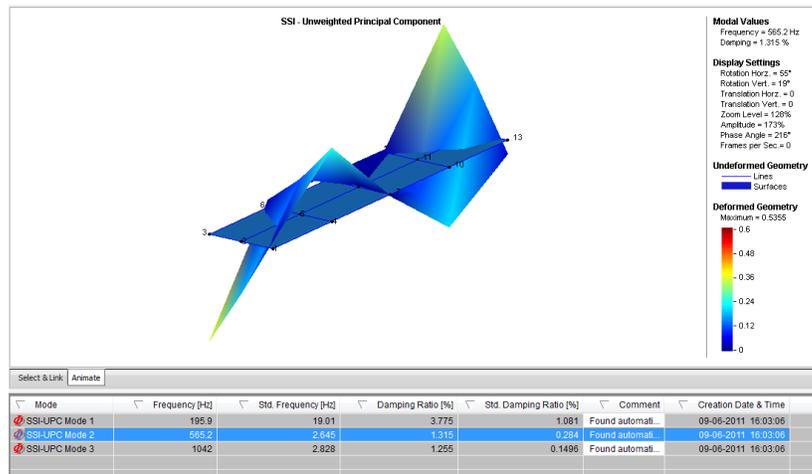
Espectro

Resultados de análisis modal operacional en la placa excitada por una señales armónicas.

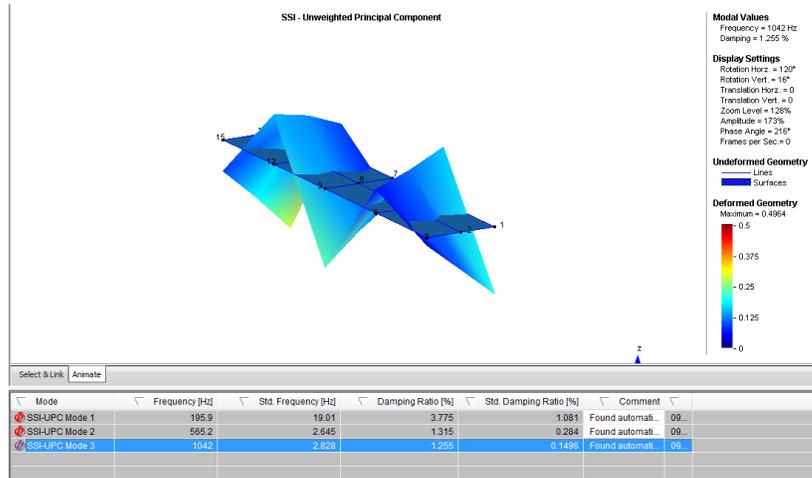
Resultados SSI-UPC



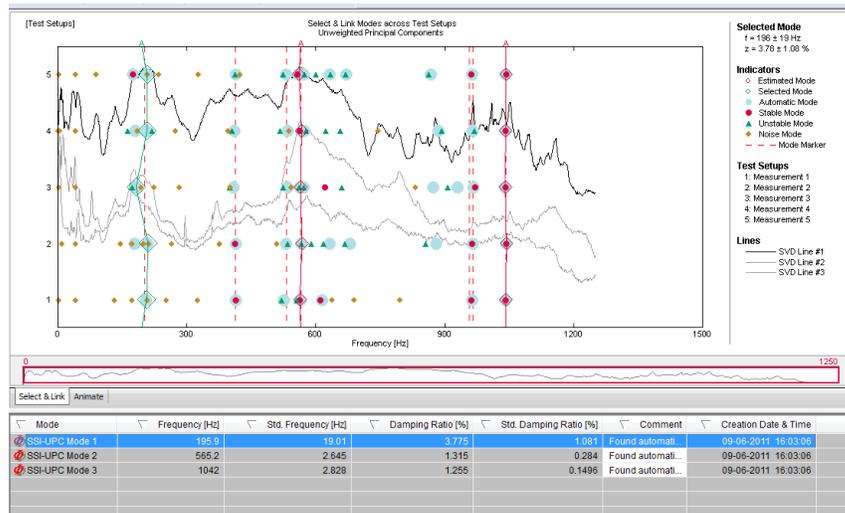
1 modo



2 modo

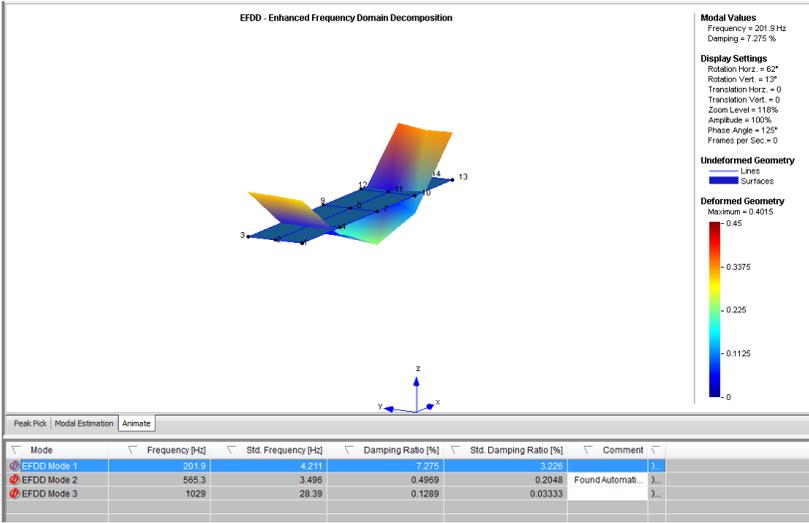


3 modo

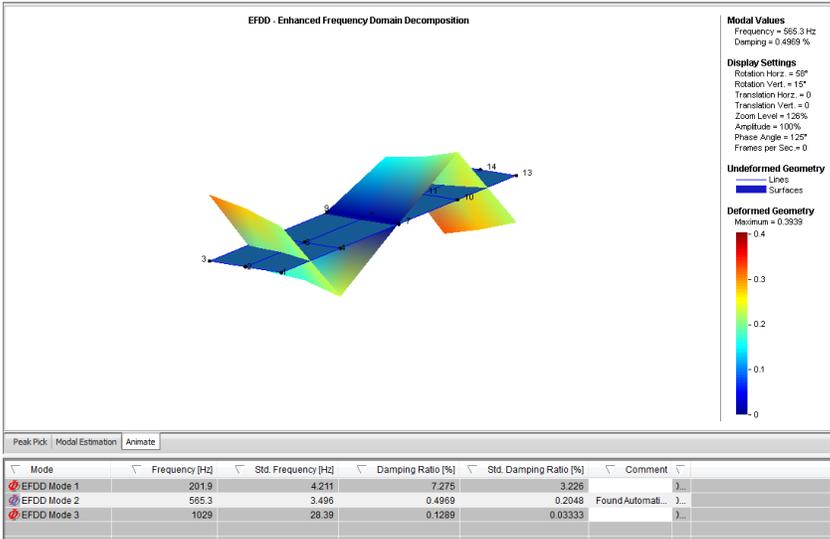


Espectro

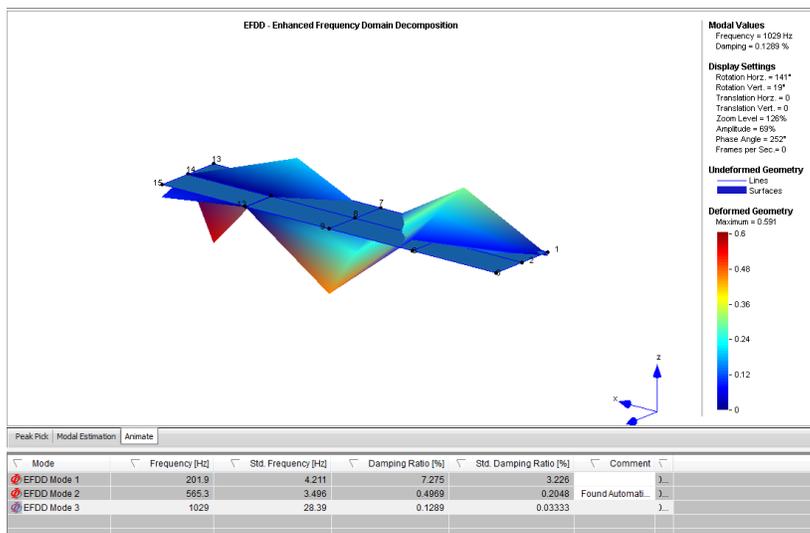
Resultados EFDD



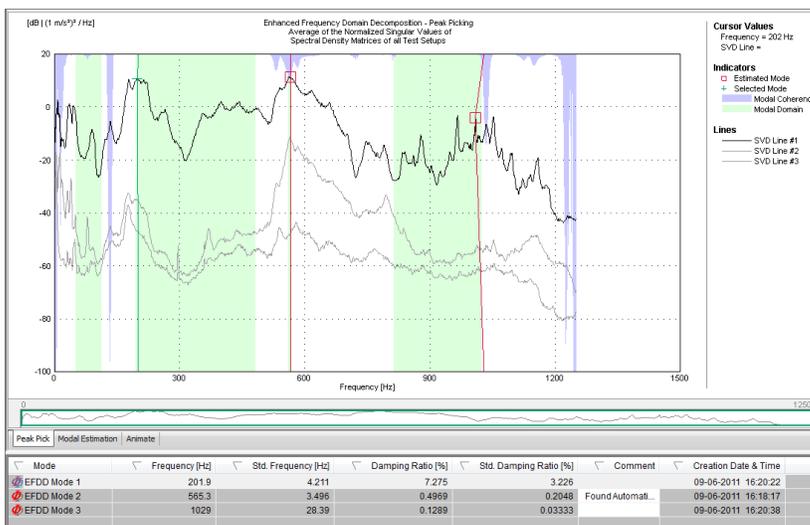
1 modo



2 modo



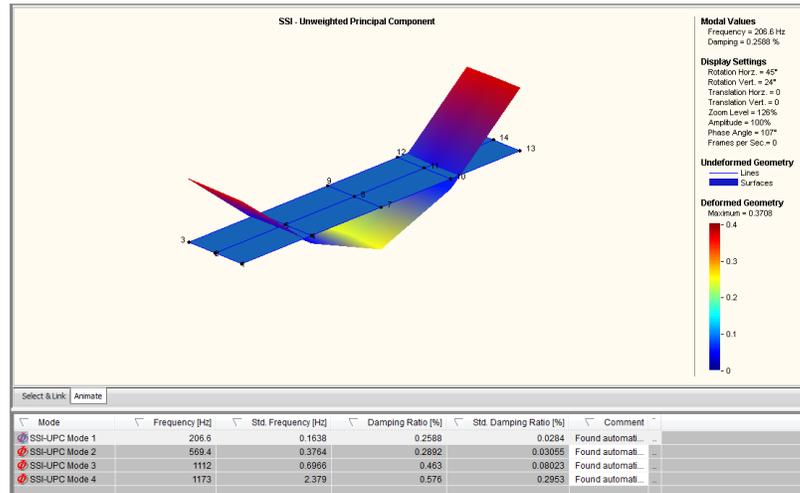
3 modo



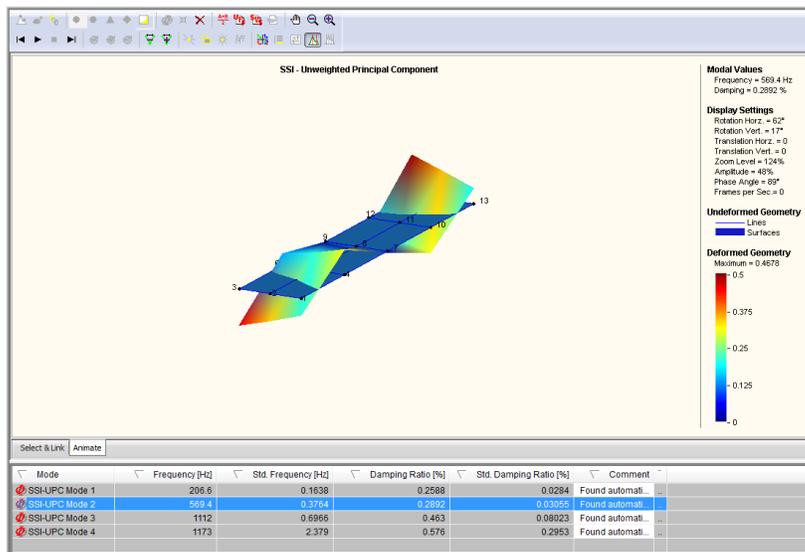
Espectro

Resultados de análisis modal operacional en la placa excitada por una serie de impactos

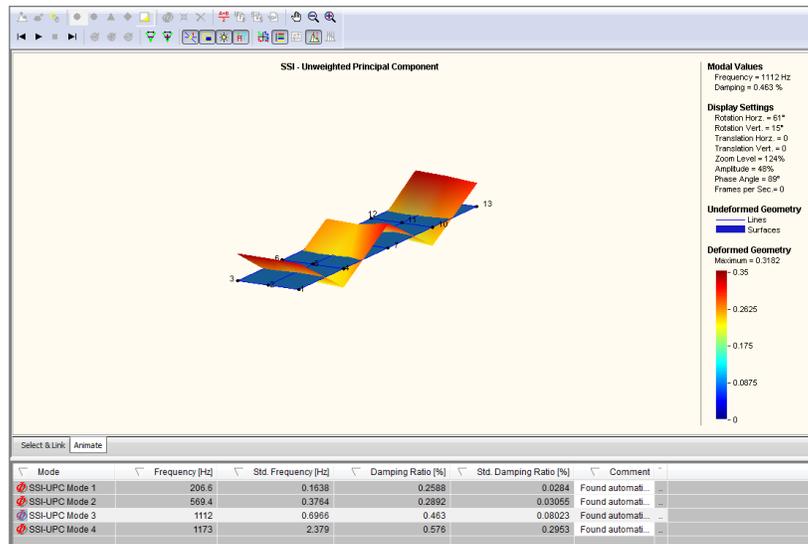
Resultados SSI-UPC



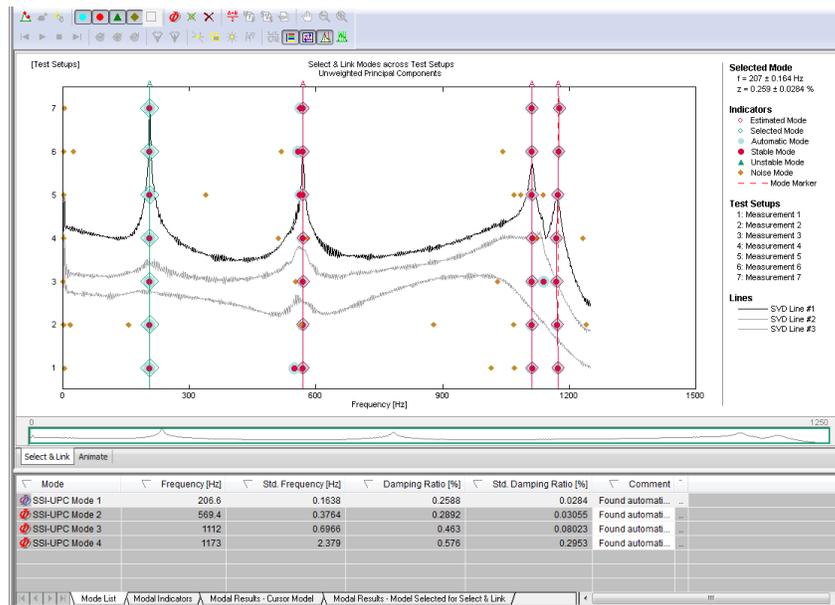
1 modo



2 modo

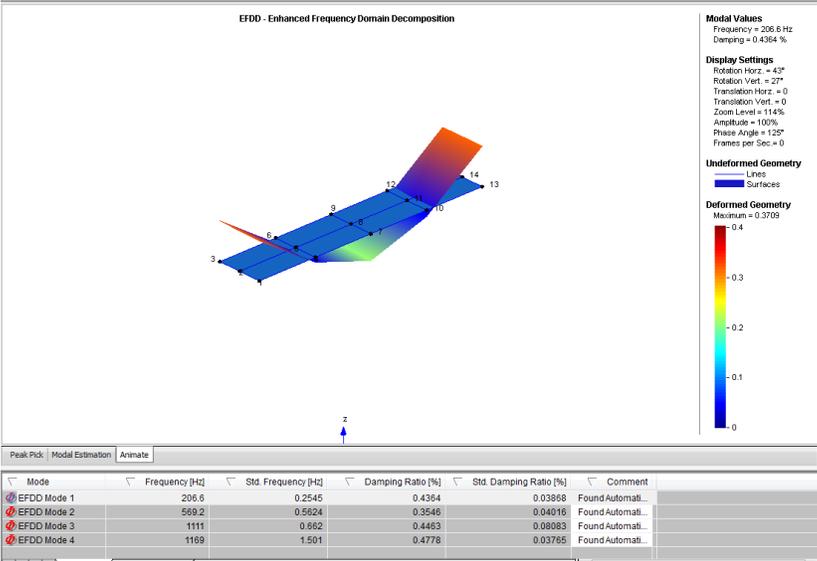


3 modo

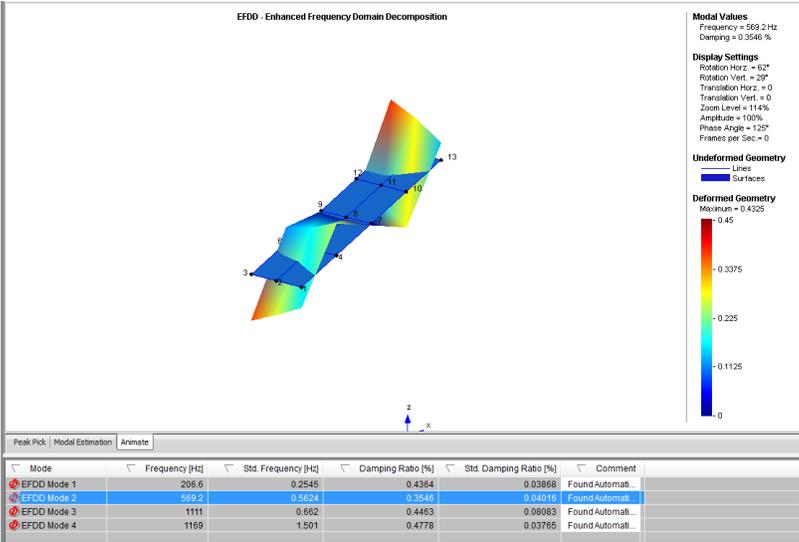


Espectro

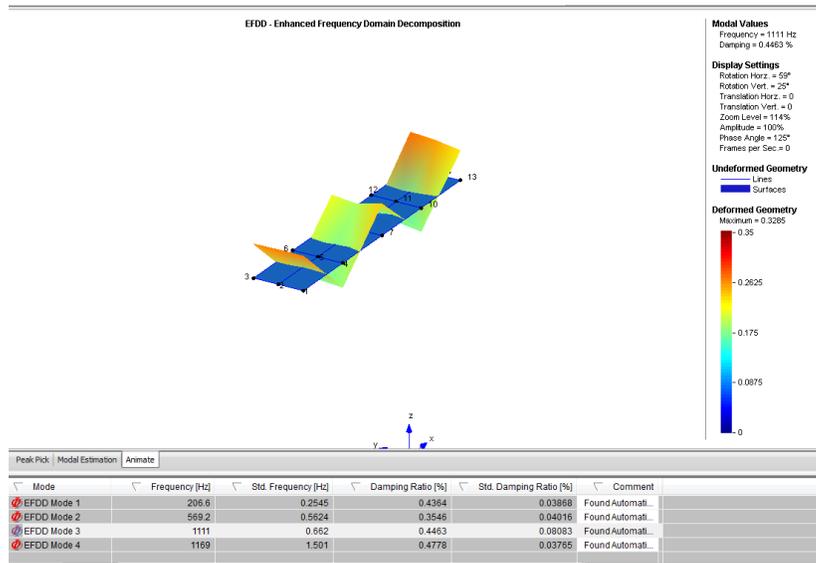
Resultados EFDD



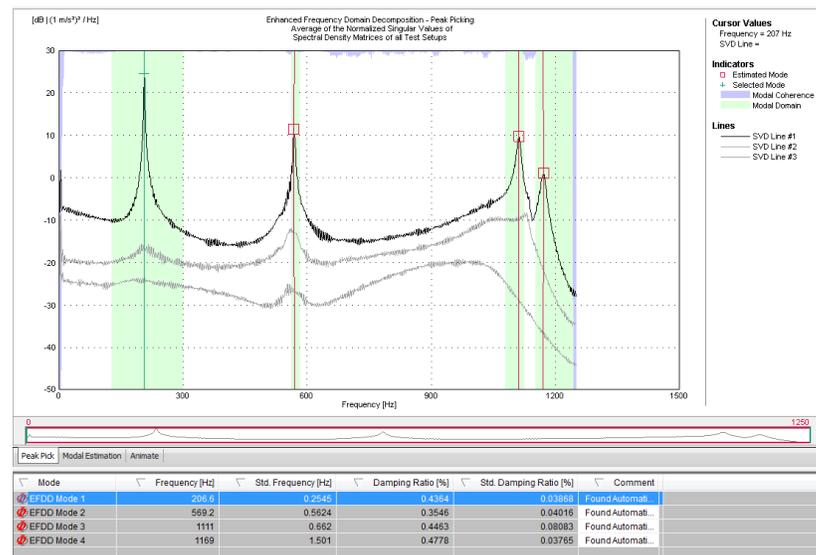
1 modo



2 modo



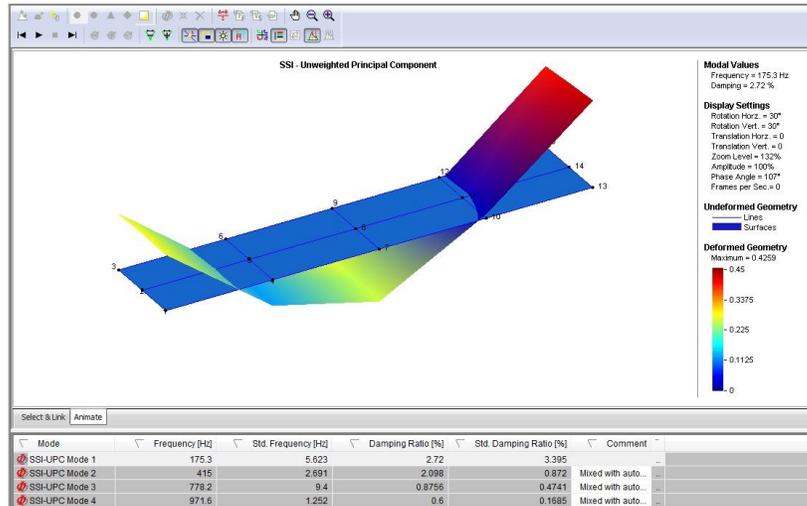
3 modo



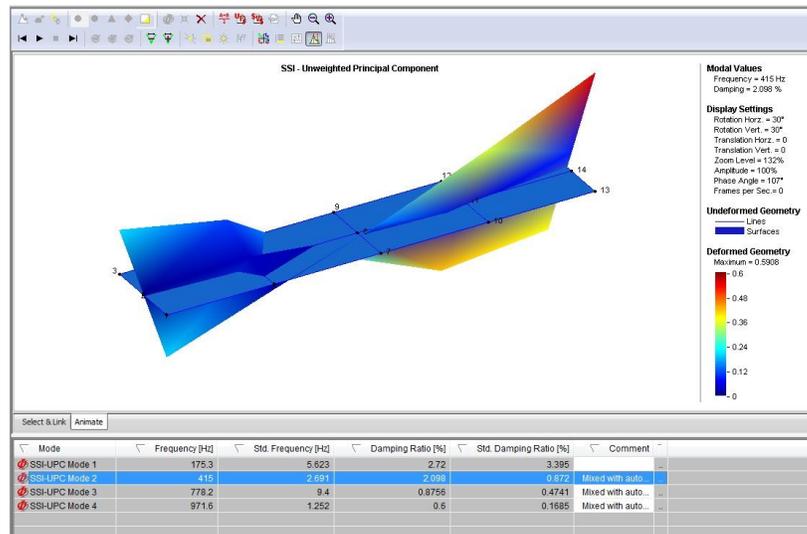
Espectro

Resultados de análisis modal operacional en la placa con motor excitada por motor eléctrico en operación

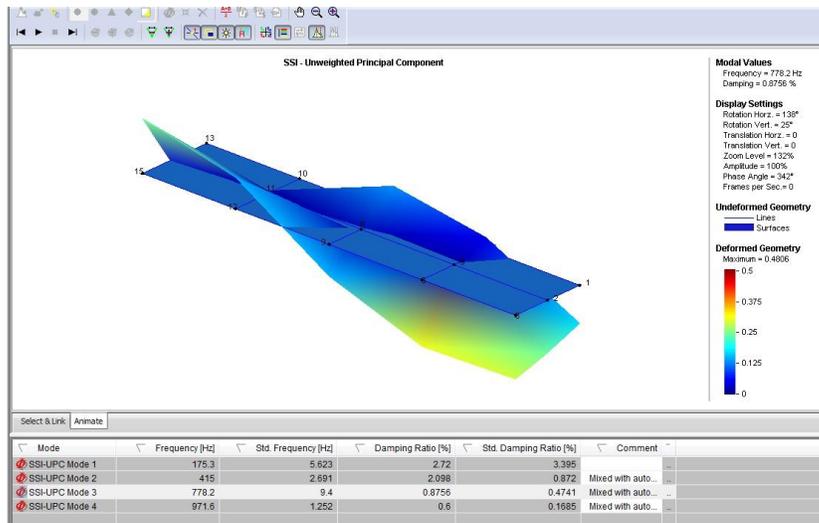
Resultados SSI-UPC



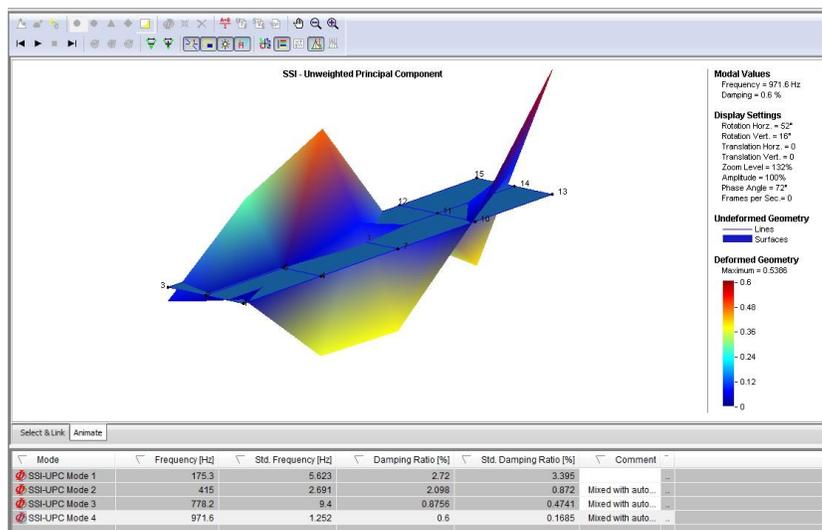
1 modo



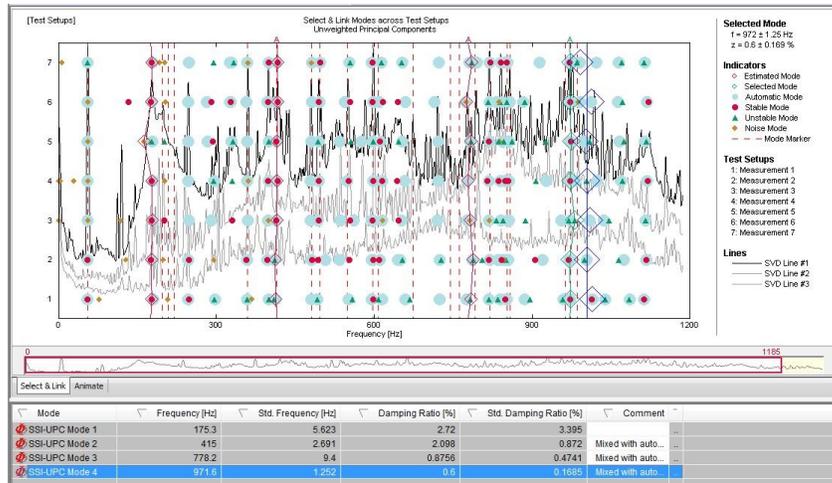
2 modo



3 modo

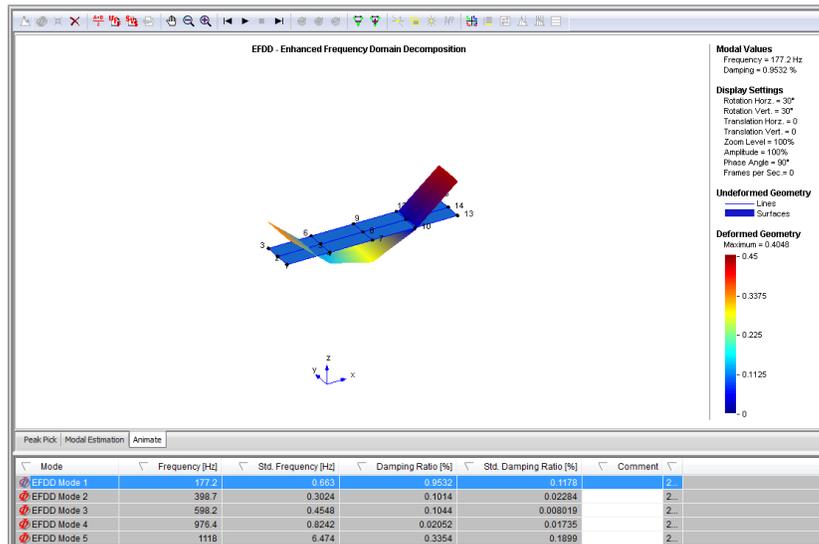


4 modo

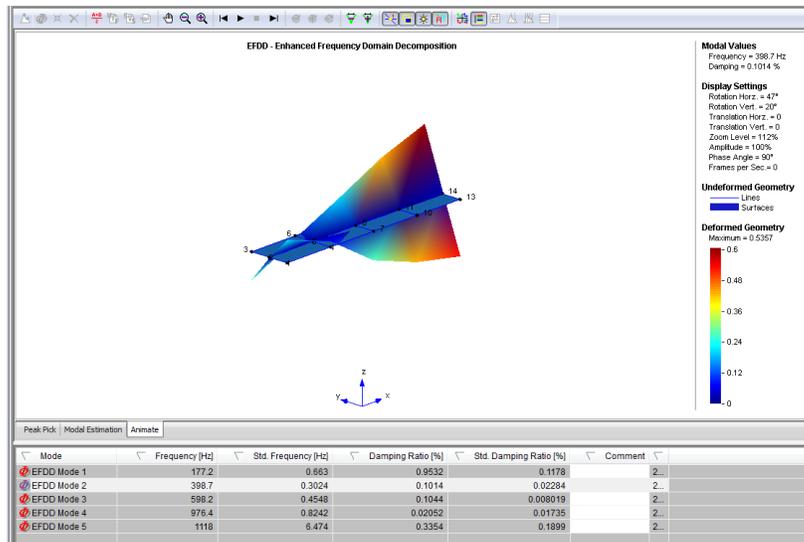


Espectro

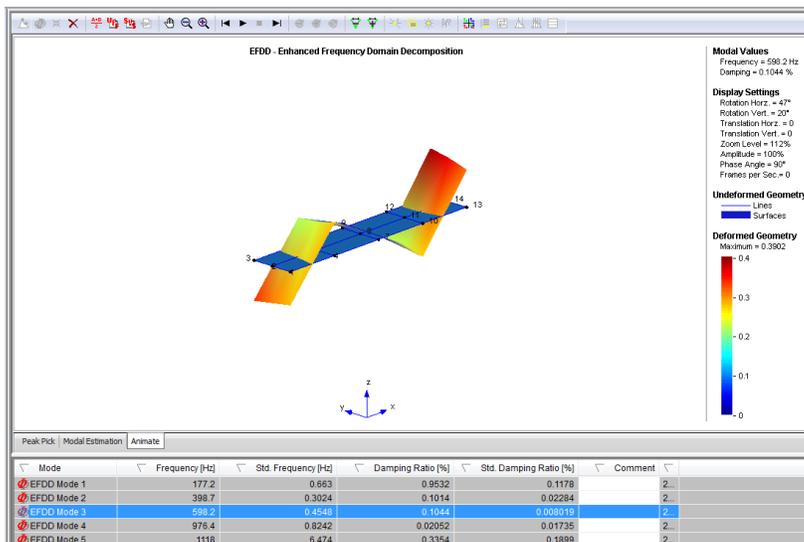
Resultados EFDD



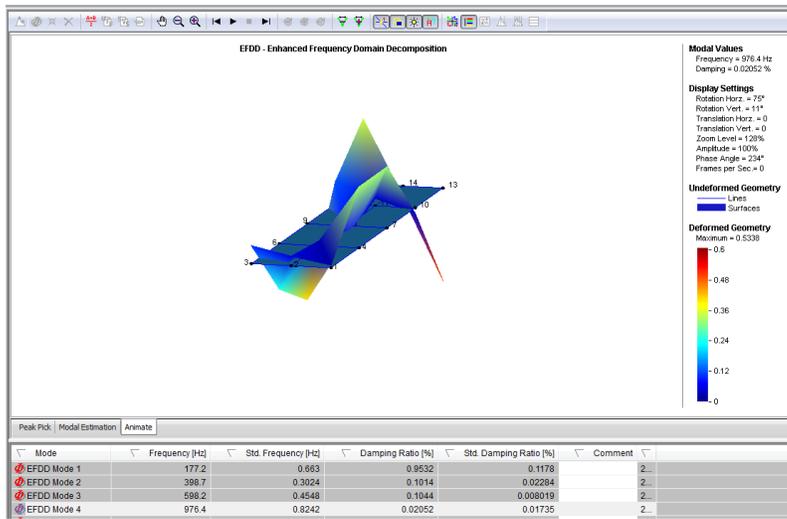
1 modo



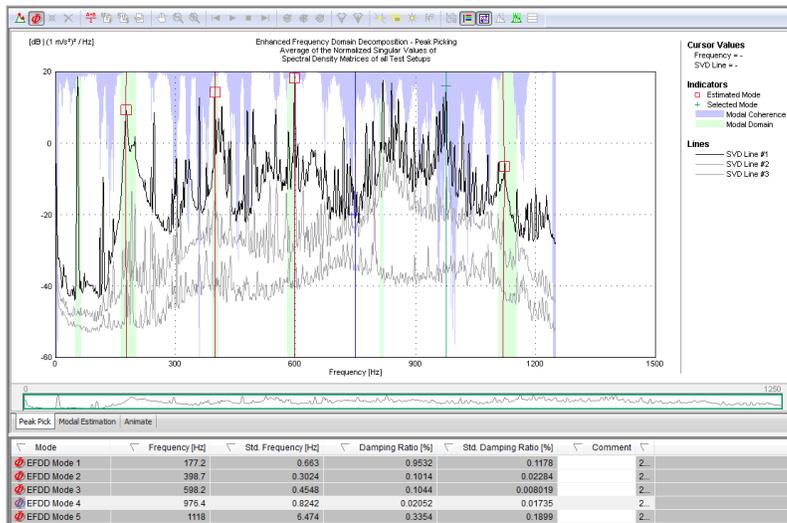
2 modo



3 modo



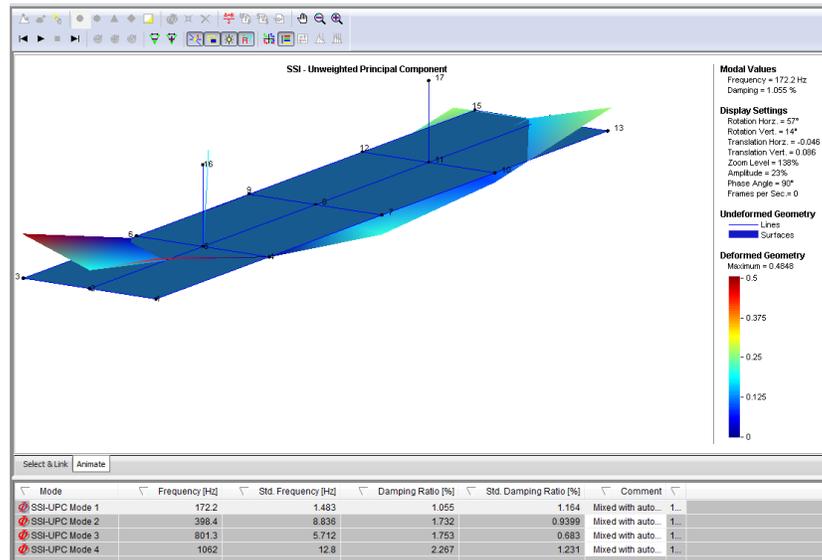
4 modo



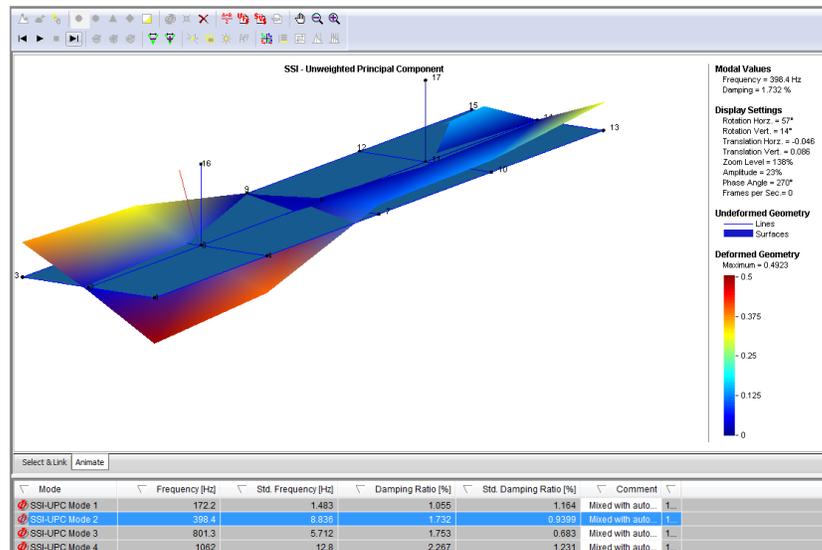
Espectro

Resultados de análisis modal operacional en Rotorkit excitado por motor eléctrico en operación

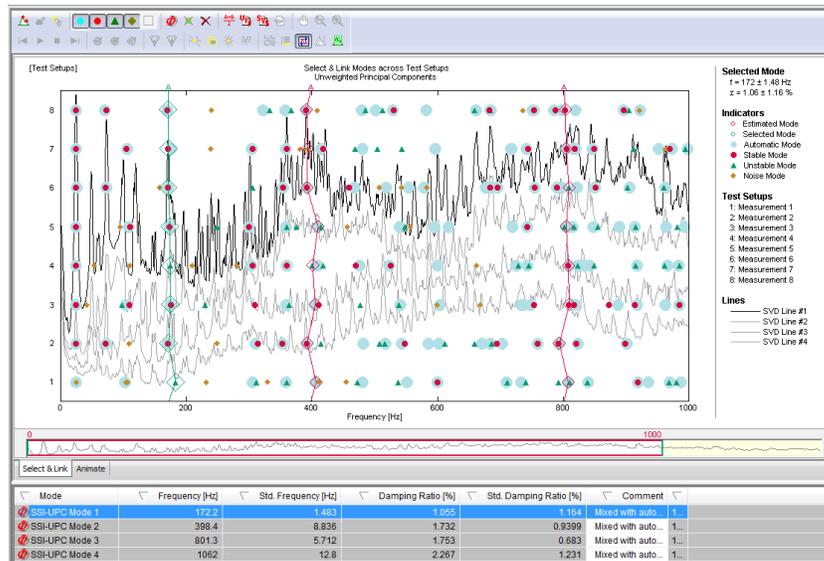
Resultados SSI-UPC



1 modo

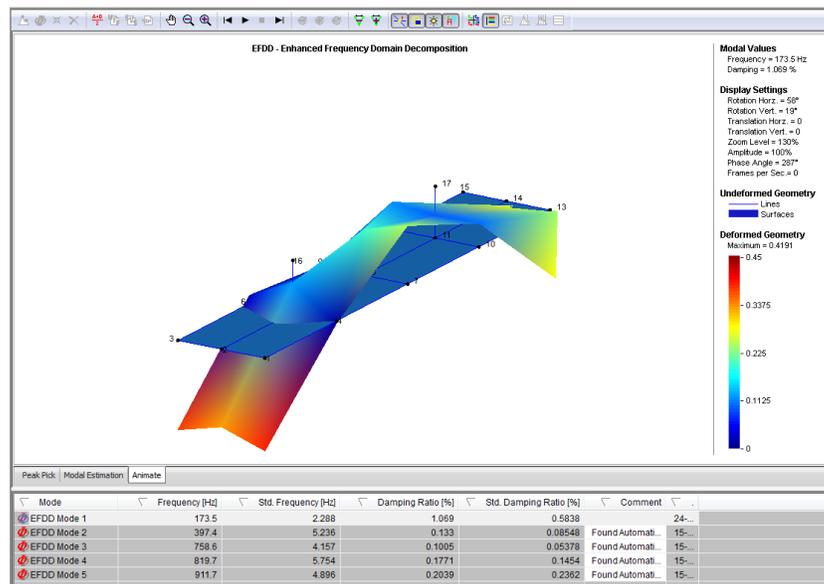


2 modo

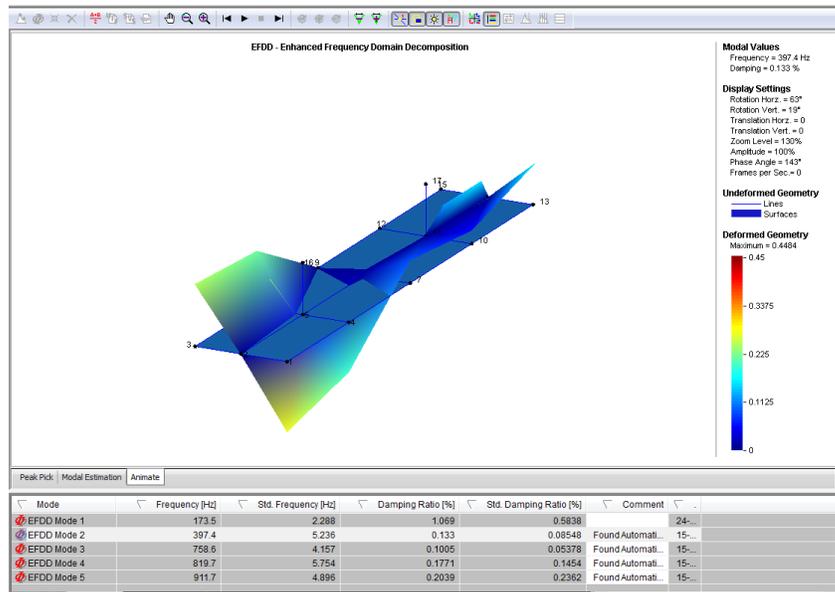


Espectro

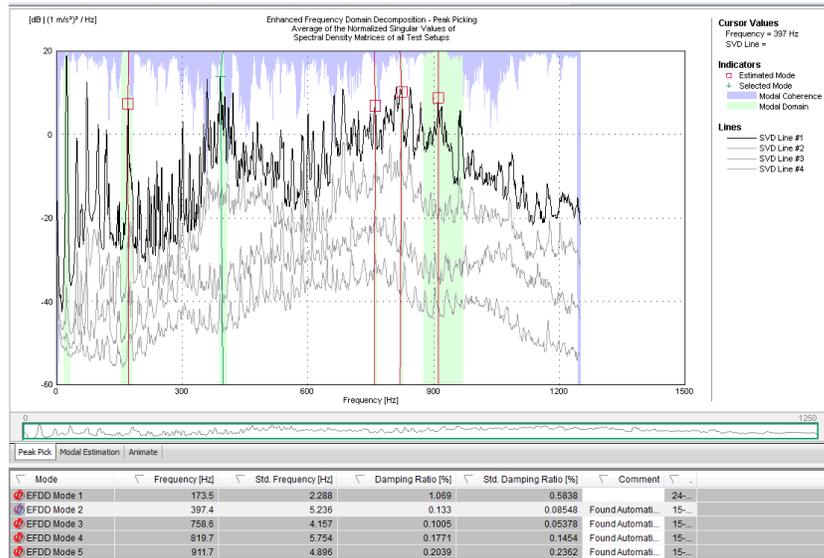
Resultados EFDD



1 modo



2 modo



Espectro

ANEXO H

ESTADISTICOS DESCRIPTIVOS

Estadísticos descriptivos de las configuraciones en EMA.

EMA configuraciones	Frecuencia Natural	media [Hz]	desviación [Hz]	Número datos
Eje impactos	1	201,01	3,033	80
	2	554,95	7,91	80
	3	1077,65	12,44	80
Eje Barrido sinusoidal	1	181,08	5,06	20
	2	517,6	9,83	20
	3	1038,49	12,58	20
Placa impactos	1	207,29	1,11	22
	2	571	0,88	12
	3	1113,3	0,84	22
Placa barrido sinusoidal	1	206,63	0,49	21
	2	570,35	0,38	21
	3	1109,64	1,034	21
Placa con motor impactos	1	180,76	0,58	32
	2	419,55	0,79	36
	3	753,95	3,29	32
	4	1009,32	3,75	22
Rotorkit impactos	1	178,73	2,43	76
	2	392,3	3,75	48
Rotorkit barrido sinusoidal	1	174,73	0	24
	2	391,85	0,21	18

Fuente: Datos del anexo D

HISTOGRAMAS DE LOS ENSAYOS EMA

Los siguientes histogramas fueron hechos con el software IBM SPSS 19, con una licencia a prueba.

Histogramas para el ensayo modal de impacto el eje:

Figura 1. Histograma del ensayo modal de impacto en el eje; 1era Frecuencia natural.

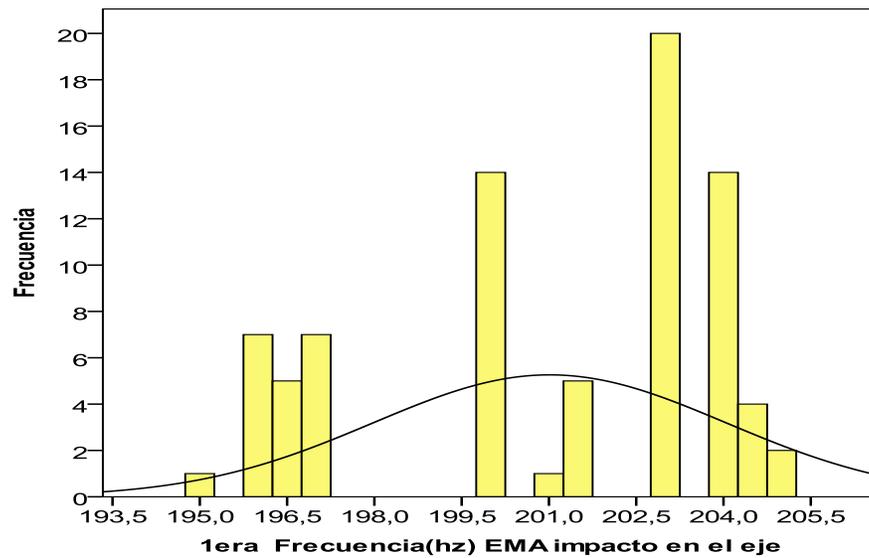


Figura 2. Histograma del ensayo modal de impacto en el eje; 2da Frecuencia natural.

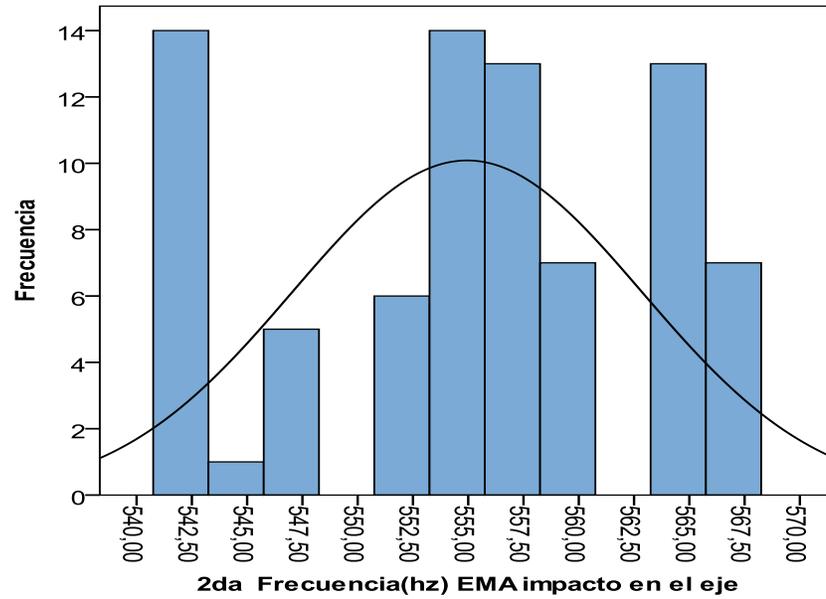
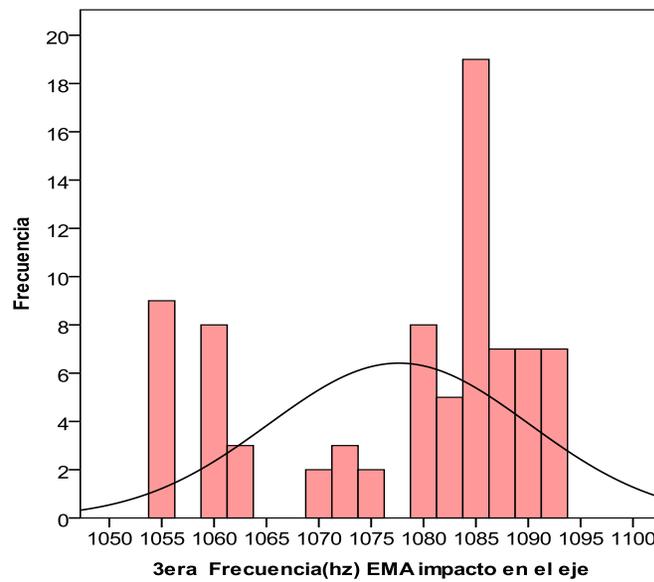


Figura 3. Histograma del ensayo modal de impacto en el eje; 3era Frecuencia natural.



Histogramas para el ensayo modal con barrido sinusoidal en el eje:

Figura 4. Histograma del ensayo modal con barrido sinusoidal en el eje; 1era Frecuencia natural.

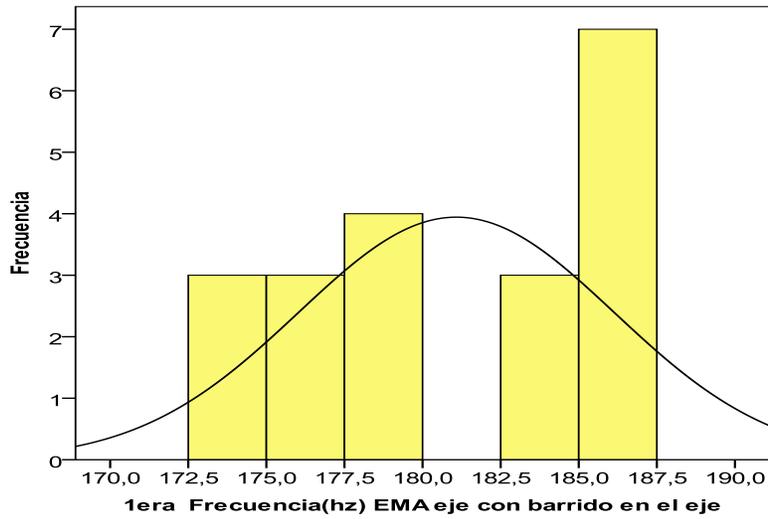


Figura 5. Histograma del ensayo modal con barrido sinusoidal en el eje; 2da Frecuencia natural.

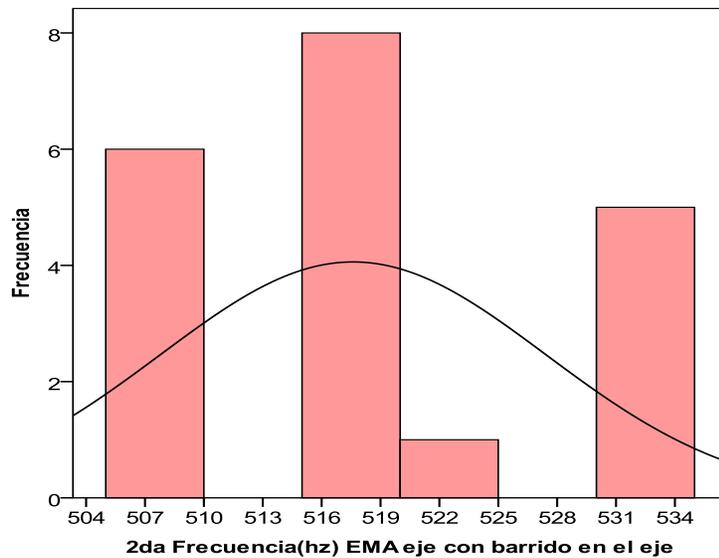
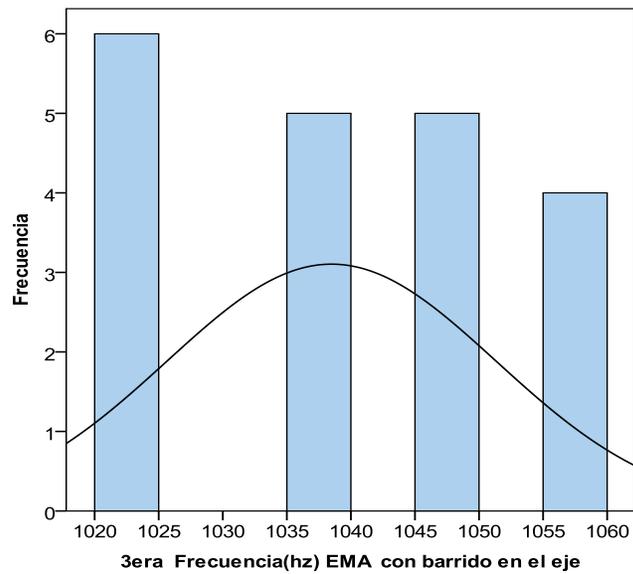


Figura 6. Histograma del ensayo modal con barrido sinusoidal en el eje; 3era Frecuencia natural.



Histogramas para el ensayo modal de impacto en la placa:

Figura 7. Histograma del ensayo modal de impacto en la placa; 1era Frecuencia natural.

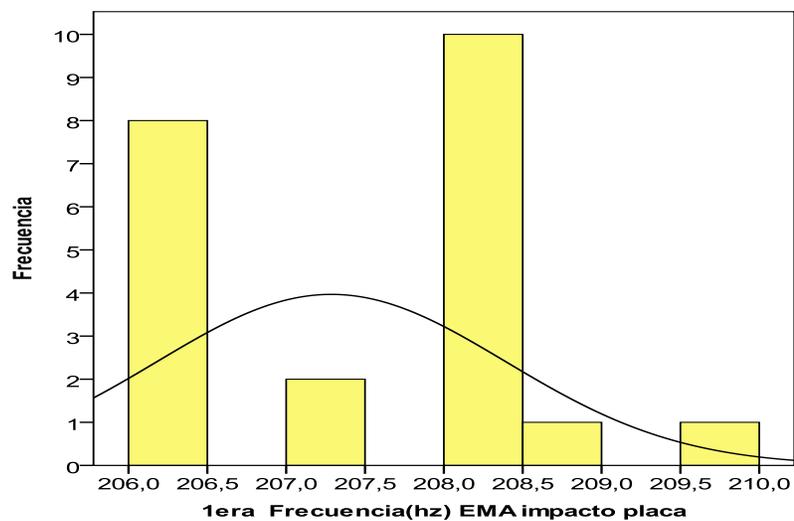


Figura 8. Histograma del ensayo modal de impacto en la placa; 2da Frecuencia natural

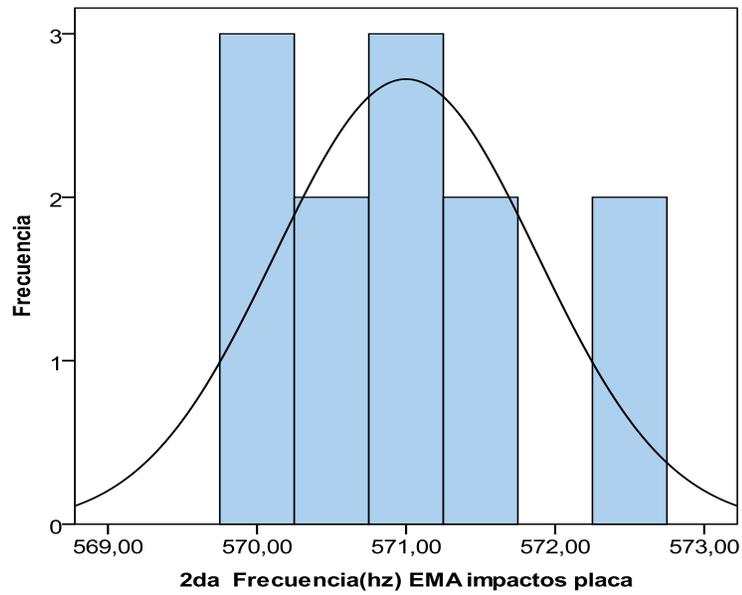
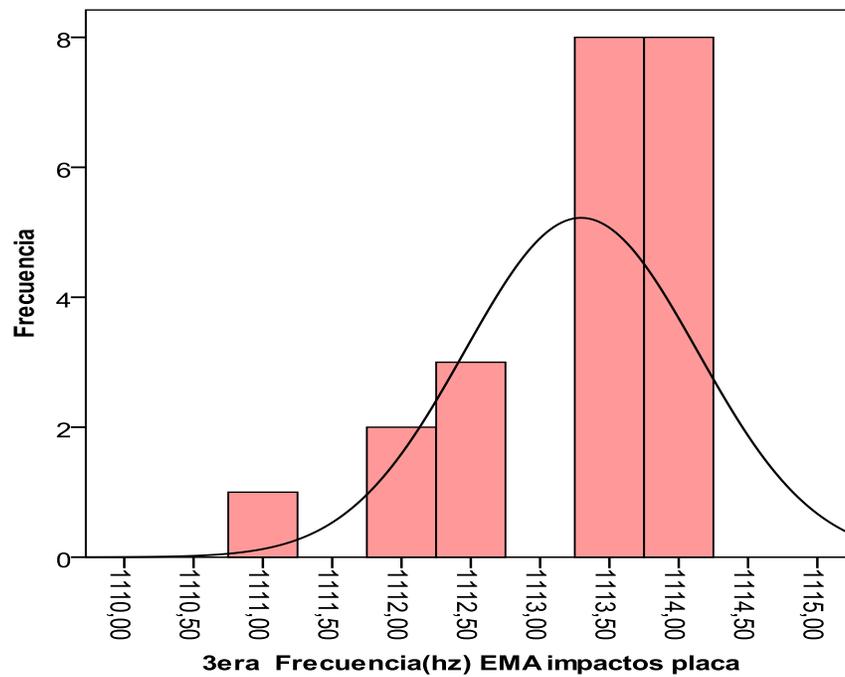
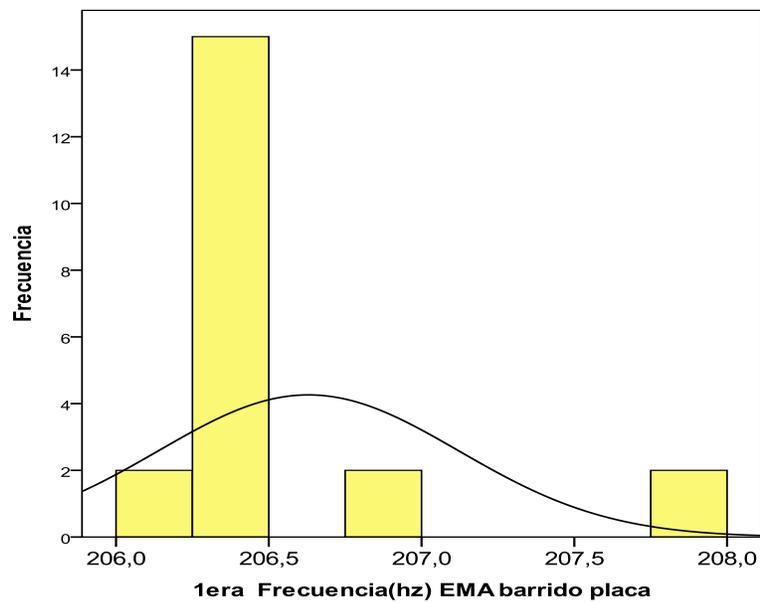


Figura 9. Histograma del ensayo modal de impacto en la placa; 3era Frecuencia natural.

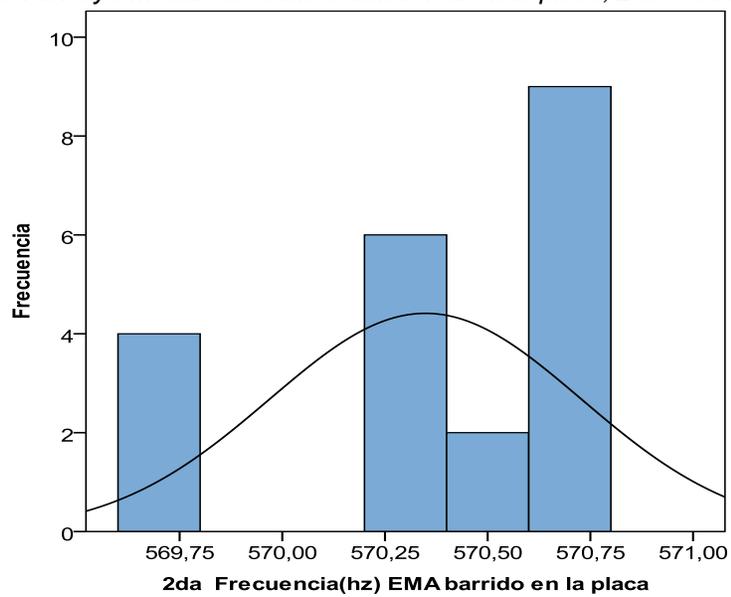


Histogramas para el ensayo modal con barrido sinusoidal en la placa:

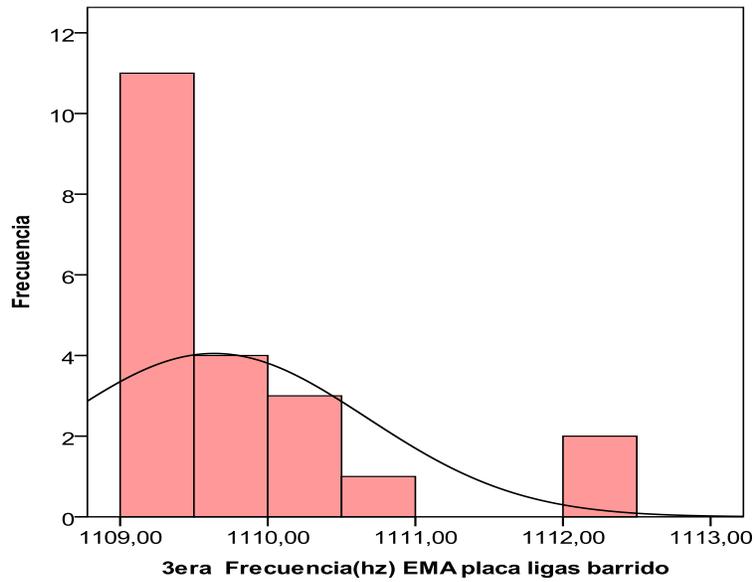
Figura 10. Histograma del ensayo modal con barrido sinusoidal en la placa; 1era Frecuencia natural.



Histograma del ensayo modal con barrido sinusoidal en la placa; 2da Frecuencia natural.



Histograma del ensayo modal con barrido sinusoidal en la placa; 3era Frecuencia natural.



Histogramas para el ensayo modal impacto en la placa con motor

Figura 11. Histograma del ensayo modal de impacto en la placa con motor; 1era Frecuencia natural

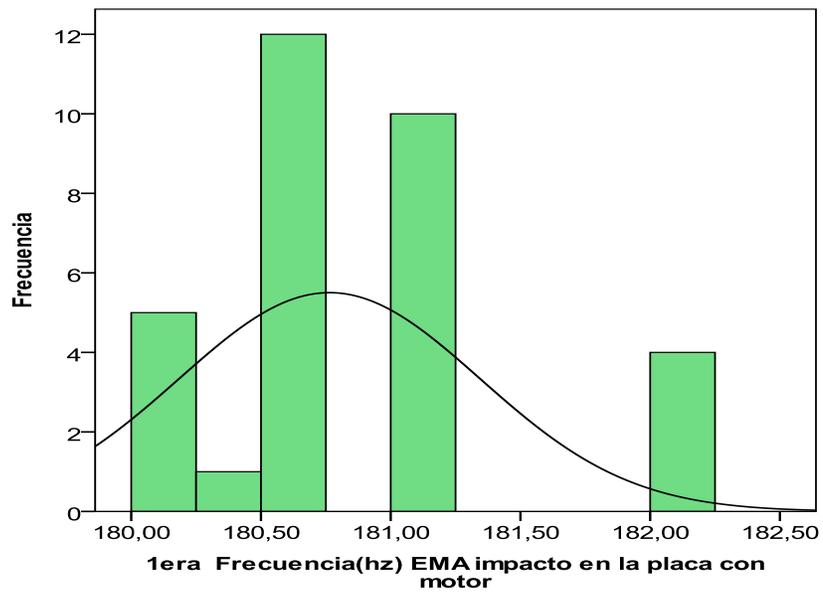


Figura 12. Histograma del ensayo modal de impacto en la placa con motor; 2da Frecuencia natural

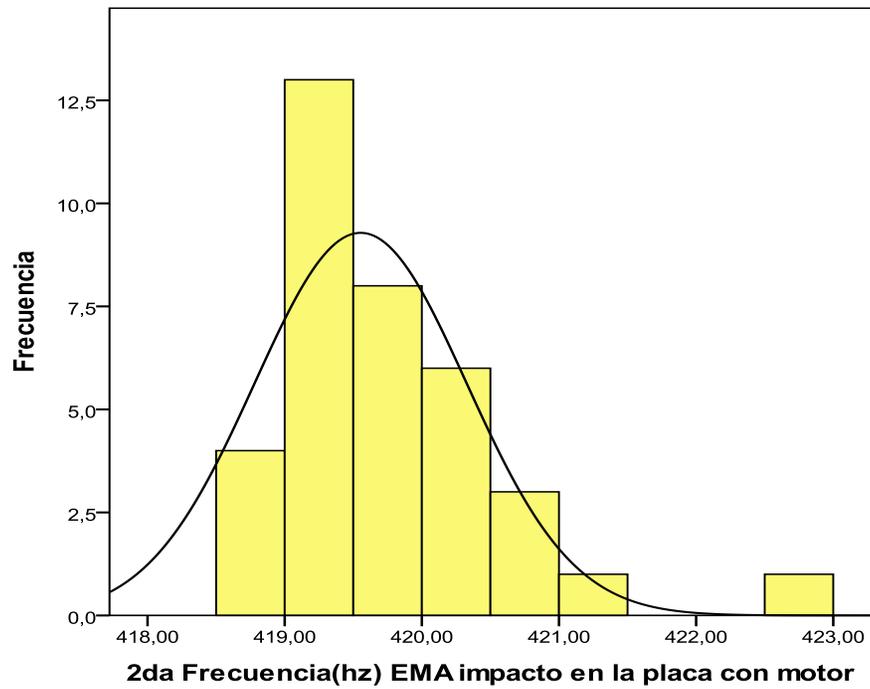


Figura 13. Histograma del ensayo modal de impacto en la placa con motor; 3era Frecuencia natural

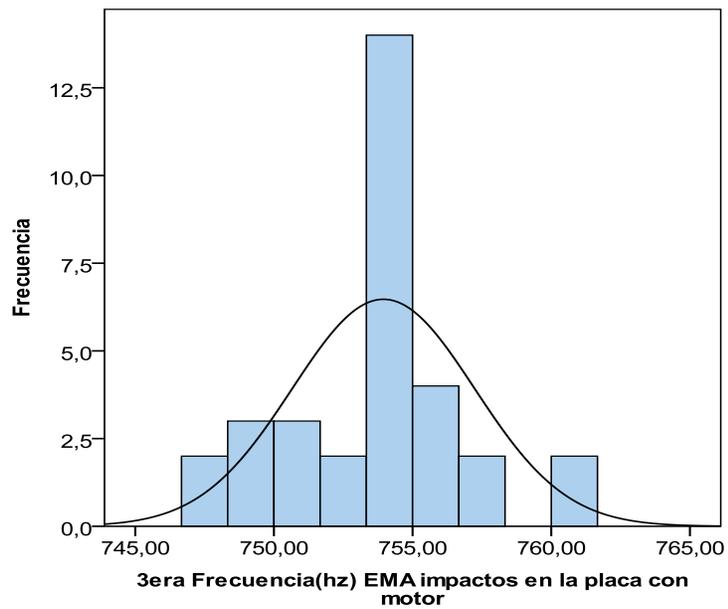
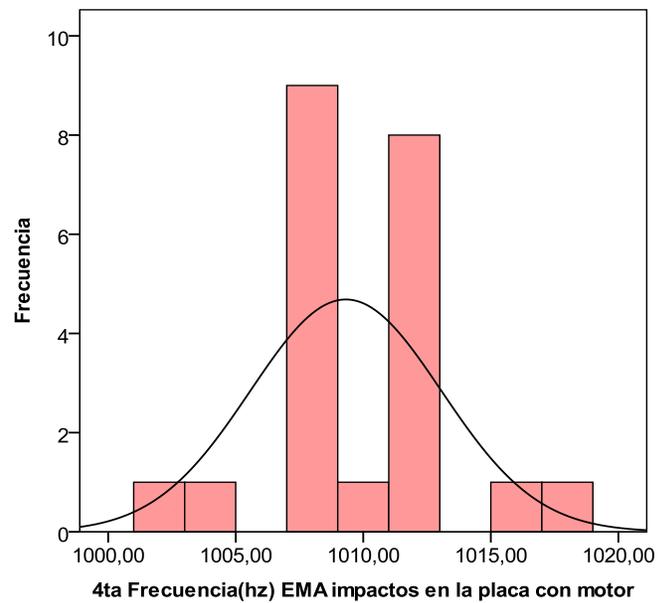


Figura 14. Histograma del ensayo modal de impacto en la placa con motor; 4ta Frecuencia natural



Ensayo modal de impacto en el Rotorkit:

Figura 15. Histograma del ensayo modal de impacto en el Rotorkit; 1ra Frecuencia natural

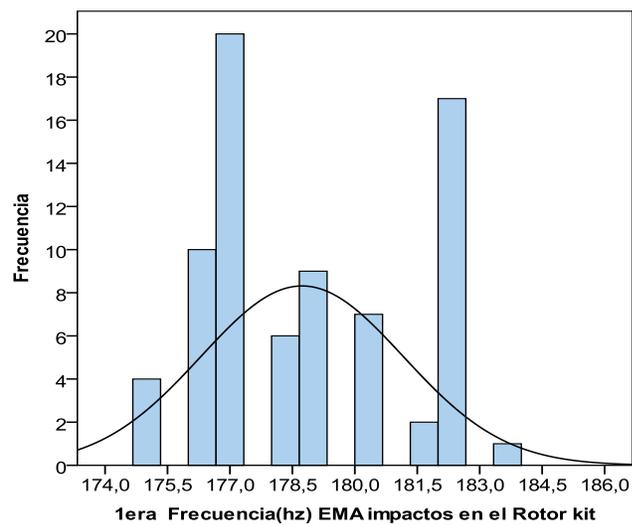
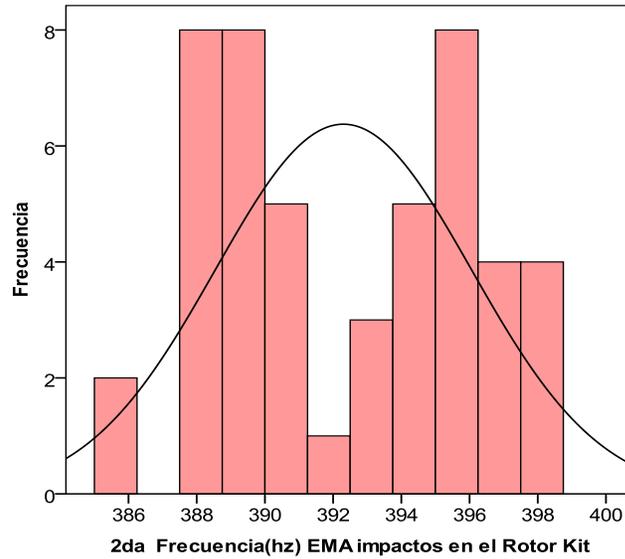


Figura 16. Histograma del ensayo modal de impacto en el Rotorkit; 2da Frecuencia natural



Histogramas para el ensayo modal con barrido sinusoidal en el Rotorkit

Figura 17. Histograma del ensayo modal barrido sinusoidal en el Rotorkit; 1era Frecuencia natural.

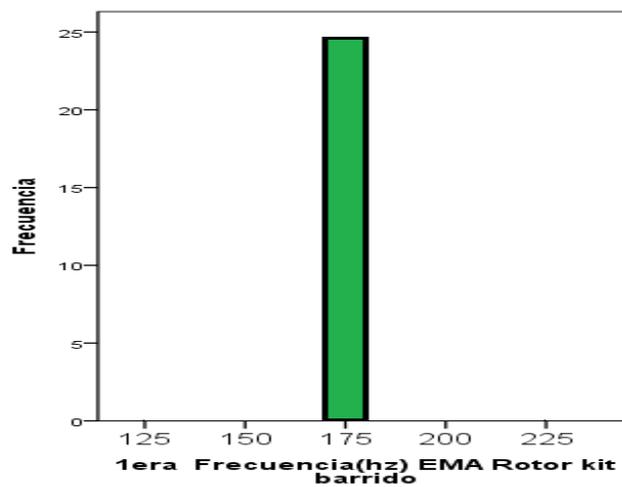


Figura 18. Histograma del ensayo modal barrido sinusoidal en el Rotorkit; 2da Frecuencia natural.

