



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

“DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA ADQUISICIÓN Y ANÁLISIS DE SEÑALES DE VIBRACIONES DE MODOS DE FALLA MECÁNICOS”

**MONTERO AGUILAR DIEGO EFREN
NARVÁEZ MOROCHO JHON DAVID**

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO DE MANTENIMIENTO

**RIOBAMBA – ECUADOR
2015**

ESPOCH

Facultad de Mecánica

CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS

2014-10-03

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

MONTERO AGUILAR DIEGO EFREN

Titulada:

**“DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA
ADQUISICIÓN Y ANÁLISIS DE SEÑALES DE VIBRACIONES DE MODOS
DE FALLA MECÁNICOS”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

INGENIERO DE MANTENIMIENTO

Ing. Marco Santillán
DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Eduardo Hernández
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Pablo Montalvo
ASESOR DE TESIS

ESPOCH

Facultad de Mecánica

CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS

2014-10-03

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

NARVÁEZ MOROCHO JHON DAVID

Titulada:

**“DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA
ADQUISICIÓN Y ANÁLISIS DE SEÑALES DE VIBRACIONES DE MODOS
DE FALLA MECÁNICOS”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

INGENIERO DE MANTENIMIENTO

Ing. Marco Santillán
DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Eduardo Hernández
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Pablo Montalvo
ASESOR DE TESIS

ESPOCH

Facultad de Mecánica

CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: MONTERO AGUILAR DIEGO EFREN

TÍTULO DE LA TESIS: “DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA ADQUISICIÓN Y ANÁLISIS DE SEÑALES DE VIBRACIONES DE MODOS DE FALLA MECÁNICOS”

Fecha de Examinación: 2015-05-28

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Fernando González PRESIDENTE TRIB. DEFENSA			
Ing. Eduardo Hernández DIRECTOR DE TESIS			
Ing. Pablo Montalvo ASESOR DE TESIS			

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Ing. Fernando González
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

ESPOCH

Facultad de Mecánica

CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: NÁRVAEZ MOROCHO JHON DAVID

TÍTULO DE LA TESIS: “DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA ADQUISICIÓN Y ANÁLISIS DE SEÑALES DE VIBRACIONES DE MODOS DE FALLA MECÁNICOS”

Fecha de Examinación: 2015-05-28

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Fernando González PRESIDENTE TRIB. DEFENSA			
Ing. Eduardo Hernández DIRECTOR DE TESIS			
Ing. Pablo Montalvo ASESOR DE TESIS			

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Ing. Fernando González
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

DERECHOS DE AUTORÍA

El trabajo de grado que presentamos, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos-científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad de los autores. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Diego Efrén Montero Aguilar

Jhon David Narváez Morocho

DEDICATORIA

Este logro se lo dedico a Dios por regalarme cada día la oportunidad de luchar por mis sueños, a mis padres amados por ser el ejemplo y pilar en mi vida, por enseñarme a no rendirme jamás, por darme a entender que el conocimiento vale más que un cartón colgado en la pared, que la vida es más fácil cuando se aprende a poner el otro lado de la mejilla, este triunfo es más de ustedes que mío.

Diego Efrén Montero Aguilar

Dedico este trabajo a Dios, a mis padres y a todas las personas que han estado durante mi formación profesional, quienes han sido un pilar importante y muy necesario en esta etapa tan importante de mi vida.

Jhon David Narváez Morocho

AGRADECIMIENTO

A Dios por haber derramado abundantes bendiciones sobre mí, a mis padres que han hecho posible que este sueño se haga realidad, su gran esfuerzo y sacrificio hoy da sus primeros frutos y a mi familia que siempre han demostrado su confianza en mí.

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a la Escuela de Ingeniería de Mantenimiento que me ha brindado una profesión con la cual podré ser un elemento positivo para la sociedad. Un agradecimiento enorme al Ingeniero Eduardo Hernández que ha confiado mucho en nuestras capacidades y ha demostrado ser un ejemplo como profesional y ser humano, al Ingeniero Pablo Montalvo cuya asesoría ha hecho posible la realización de este proyecto.

Diego Efrén Montero Aguilar

A Dios por haberme dado la oportunidad de culminar con éxito una etapa tan importante de mi vida.

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a la Escuela de Ingeniería de Mantenimiento y mis maestros, por brindarnos la oportunidad de obtener una profesión y ser personas útiles a la sociedad. En forma especial al Ingeniero Eduardo Hernández y al Ingeniero Pablo Montalvo quienes con su asesoría nos ayudaron en la realización de este proyecto.

A mis padres y hermanos quienes de manera incondicional me ayudaron y guiaron, gracias por su constante lucha y perseverancia que han hecho de mí un hombre de bien.

Jhon David Narváez Morocho

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Justificación.....	1
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 <i>Objetivo general</i>	2
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	2
2. MARCO TEÓRICO	
2.1 Vibración.....	3
2.2 Origen de las frecuencias de vibración	3
2.2.1 <i>Frecuencias generadas</i>	3
2.2.2 <i>Frecuencias originadas por fenómenos externos a la máquina</i>	3
2.2.3 <i>Frecuencias originadas por fenómenos electromagnéticos</i>	3
2.2.4 <i>Frecuencia natural</i>	3
2.3 Tipos de señales.....	4
2.3.1 <i>Señales periódicas</i>	4
2.3.2 <i>Señales aleatorias</i>	4
2.4 Elemento de una onda.....	5
2.4.1 <i>Amplitud</i>	5
2.4.2 <i>Fase</i>	6
2.4.3 <i>Periodo</i>	6
2.4.4 <i>Frecuencia</i>	6
2.5 Magnitudes de la vibración	6
2.5.1 <i>Desplazamiento</i>	6
2.5.2 <i>Velocidad</i>	7
2.5.3 <i>Aceleración</i>	7
2.6 Representación de la vibración	8
2.6.1 <i>Representación en el dominio del tiempo</i>	8
2.6.2 <i>Señales en el dominio de la frecuencia</i>	8
2.7 Transformada de Fourier	9
2.7.1 <i>Transformada discreta de Fourier</i>	9
2.7.2 <i>Transformada rápida de Fourier</i>	9
2.8 Normativas de vibraciones.....	10
2.8.1 <i>Normas de severidad de vibraciones</i>	11
2.8.2 <i>Norma ISO 10816-1:1995</i>	11
2.8.3 <i>Criterios de evaluación</i>	11
2.9 Transductores de vibración.....	13
2.9.1 <i>Transductor de desplazamiento</i>	13
2.9.2 <i>Transductor sísmico de velocidad</i>	14
2.9.3 <i>Transductor piezoeléctrico</i>	14
2.10 Software LabVIEW	14
2.10.1 <i>Interfaz de LabVIEW</i>	15
2.10.2 <i>Teorema del muestreo</i>	19
2.10.2.1 <i>Aliases</i>	19
2.10.2.2 <i>Filtro anti-aliasing</i>	19
2.10.3 <i>Ventanas</i>	20
2.10.3.1 <i>Ventana Hanning</i>	20
2.10.3.2 <i>Ventana Rectangular</i>	20
2.10.3.3 <i>Ventana Flat top</i>	20

3.	DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN PARA ANÁLISIS VIBRACIONAL	
3.1	Determinación de las características del software.....	22
3.1.1	<i>Determinación de la información que necesita el laboratorio.....</i>	22
3.1.2	<i>Análisis de la interfaz del software MAINTraq viewer.....</i>	22
3.2	Análisis de las características técnicas de los equipos de medición.....	26
3.2.1	<i>Módulo NI-9234.....</i>	26
3.2.2	<i>Chasis NI cDAQ-9171.....</i>	27
3.2.3	<i>Acelerómetro PCB modelo 603C01.....</i>	27
3.3	Determinación del alcance de la aplicación.....	28
3.4	Diseño de la aplicación en labview 2012.....	29
3.4.1	<i>Diseño del panel frontal.....</i>	29
3.4.2	<i>Diseño del diagrama de bloques.....</i>	31
3.4.2.1	<i>Configuración de la DAQ assistant.....</i>	31
4.	CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO DIDÁCTICO	
4.1	Descripción general.....	38
4.2	Construcción del modular didáctico.....	38
4.2.1	<i>Diseño y construcción de la mesa.....</i>	38
4.3	Diseño y construcción de los simuladores de modo de falla.....	41
4.3.1	<i>Base del motor y placa de desalineación.....</i>	41
4.3.2	<i>Simulador de árbol elástico.....</i>	42
4.3.3	<i>Simulador de desbalanceo.....</i>	42
4.3.4	<i>Simulador de defectos en rodamientos.....</i>	42
4.3.5	<i>Simulador de eje fisurado.....</i>	42
4.4	Diseño eléctrico del modular.....	44
4.4.1	<i>Conexión y programación del variador de frecuencia.....</i>	44
4.4.2	<i>Circuito eléctrico de control y de potencia.....</i>	45
5.	PRUEBAS Y RESULTADOS	
5.1	Comparación de la aplicación VISUALspectrum con VIBRAcheck 200.....	47
5.1.1	<i>Comparación formas de onda.....</i>	48
5.1.2	<i>Comparación espectros.....</i>	50
5.2	Análisis estadístico.....	53
5.2.1	<i>La media \bar{X}.....</i>	53
5.2.2	<i>Desviación estándar σ.....</i>	53
5.2.3	<i>Coefficiente de variación.....</i>	56
6.	GUÍA DE OPERACIONES Y GUÍAS PRÁCTICAS	
6.1	Guía de operación.....	58
6.2	Guías prácticas.....	58
6.3	Plan de mantenimiento.....	58
6.3.1	<i>Codificación.....</i>	59
6.3.2	<i>Banco de tareas.....</i>	60
6.3.3	<i>Programa de mantenimiento.....</i>	61
6.3.4	<i>Fichas de las actividades de mantenimiento.....</i>	61
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
7.1	Conclusiones.....	62
7.2	Recomendaciones.....	62

BIBLIOGRAFÍA
ANEXOS

LISTA DE FIGURAS

		Pág.
1	Señales periódicas	4
2	Señales aleatorias	5
3	Magnitudes de amplitud	5
4	Representación de fase	6
5	Elementos de una onda	6
6	Comportamiento espectral del desplazamiento, velocidad y aceleración	7
7	Magnitudes: amplitud vs frecuencia	8
8	Representación de la vibración	8
9	Proxímetro	13
10	Transductor sísmico	14
11	Acelerómetro	14
12	Pantallas LabVIEW	15
13	Paleta de herramientas	16
14	Paleta de controles	16
15	Paleta de funciones	16
16	Icono DAQ assistant	17
17	Icono Level Vibration	17
18	Icono Amplitude and Level Measurements	17
19	Icono Filter	18
20	Icono Power Spectrum	18
21	Icono Peak Search	18
22	Icono While Loop	18
23	Case Structure	19
24	Alias, frecuencia de muestreo menor que la frecuencia de la señal	19
25	Efecto fuga	20
26	a) Ventana Hanning, b) ventana Rectangular y c) ventana Flat top	21
27	Configuración MAINTraQ Viewer	23
28	Configuración de apoyos	23
29	Configuración de puntos	24
30	Configuración de formas de onda	24
31	Configuración de variables	24
32	Visualización de formas de onda	25
33	Visualización de espectros	25
34	Módulo NI 9234	27
35	Chasis NI cDAQ-9171	27
36	Acelerómetro PCB modelo 603C01	27
37	ViSUALspectrum	29
38	Pestañas principales VISUALspectrum	29
39	Subpestañas VISUALspectrum	29
40	Controles de medición	29
41	Herramientas VISUALspectrum	30
42	Panel Frontal (Interfaz con el usuario)	30
43	Pestaña Documentación	31
44	Configuración DAQ assistant	32
45	Diagrama de bloques sin haber presionado el botón Medir	33
46	Diagrama de bloques después de presionar el botón Medir	33
47	Ejecución del diagrama de bloques: pestaña acelerómetro 1	34
48	Ejecución del diagrama de bloques: pestaña 1 y la subpestaña	34
49	Configuración para congelar pantalla del panel frontal	35

50	SubVis de desplazamiento, velocidad, aceleración, envolvente.....	35
51	Diagrama de bloques del Sub VI Desplazamiento	35
52	Diagrama de bloques del Sub VI Velocidad	36
53	Diagrama de bloques del Sub VI Aceleración	36
54	Diagrama de bloques del Sub VI Envolvente	37
55	Diseño de la mesa, vista frontal y lateral.....	38
56	Construcción de la mesa	39
57	Placa perfilada de aluminio anodizado.....	39
58	Diseño de las superficies laterales.....	39
59	Diseño y distribución de la mesa	40
60	Diseño y distribución por zonas de la mesa	41
61	Diseño de la base del motor y simulador de desalineación.....	42
62	Simulador de árbol elástico.....	43
63	Simulador de desbalanceo	43
64	Simulador de defectos en rodamientos.....	43
65	Simulador de eje fisurado	44
66	Conexión variador y potenciómetro.....	45
67	Circuito eléctrico	46
68	Módulo de desbalanceo LP-S1-B	47
69	Módulo de desbalanceo LP-S1-B	48
70	Forma de onda de desplazamiento Viewer	48
71	Forma de onda de desplazamiento VISUALspectrum.....	49
72	Forma de onda de velocidad Viewer.....	49
73	Forma de onda de velocidad VISUALspectrum.....	49
74	Forma de onda de aceleración Viewer.....	50
75	Forma de onda de aceleración VISUALspectrum	50
76	Espectro de desplazamiento Viewer	50
77	Espectro de desplazamiento VISUALspectrum.....	51
78	Espectro de velocidad Viewer.....	51
79	Espectro de velocidad VISUALspectrum.....	51
80	Espectro de aceleración Viewer.....	52
81	Espectro de aceleración VISUALspectrum	52
82	Histogramas: muestras de desplazamientos.....	54
83	Histogramas: muestras de velocidades	55
84	Histogramas: muestras de aceleraciones	55
85	Comportamiento de las muestras en la magnitud de desplazamiento.....	57
86	Comportamiento de las muestras en la magnitud de velocidad.....	57
87	Comportamiento de las muestras en la magnitud de aceleración	57
88	Estructura de la codificación	59

LISTA DE TABLAS

Pág.

1	Normativas de vibraciones.....	10
2	Partes de la Norma 10816-1:1995.....	11
3	Clasificación de las máquinas según la ISO 10816 -1.....	12
4	Criterios de evaluación según la velocidad de vibración	12
5	Tipos de transductores	13
6	Información que proporcionará la aplicación	22
7	Herramientas del software MAINTraQ Viewer	26
8	Alcance de la aplicación a desarrollarse	28
9	Componentes eléctricos y electrónicos.....	44
10	Programación del variador de frecuencia.....	45
11	Vibración total P-P desplazamiento	49
12	Vibración total rms velocidad	49
13	Vibración total rms desplazamiento	50
14	Amplitudes de los espectros en desplazamiento.....	51
15	Amplitudes de los espectros en velocidad	52
16	Amplitudes de los espectros en aceleración	52
17	Medias aritméticas.....	53
18	Desviaciones estándar.....	54
19	Coefficientes de variación.....	56
20	Denominación de sistemas.....	60
21	Codificación del modular y los simuladores de modos de fallo.....	60
22	Banco de tareas	60
23	Programa de mantenimiento.....	61

LISTA DE ANEXOS

- A** Hoja de características técnicas del acelerómetro PCB modelo 603C01
- B** Resolución espectral y periodo de muestreo
- C** Diseño de los simuladores
- D** Tablas estadísticas y toma de muestras
- E** Hojas de características técnicas
- F** Guía de operación
- G** Guías prácticas de laboratorio
- H** Fichas de actividades de mantenimiento

RESUMEN

En la presente tesis se plantea el diseño y ejecución de un modular para el desarrollo de las prácticas de laboratorio sobre análisis de vibraciones, el modular está conformado por una aplicación informática y simuladores de modos de fallo. La aplicación informática "VISUALspectrum" ha sido diseñada mediante el software (LabVIEW) Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench, conteniendo las características más relevantes de un analizador de vibraciones, con una interfaz muy amigable para el usuario inspirada en el software MAINtraq Viewer.

Para determinar las características de "VISUALspectrum", se analizó el contenido de la materia dada en clases sobre análisis de vibraciones, obteniendo como resultado la necesidad de una aplicación que entregue formas de onda y espectros de las magnitudes de desplazamiento, velocidad, aceleración así como también de la envolvente.

Para las prácticas se han diseñado y construido simuladores de modos de fallo prestando especial atención a selección de materiales y a la calidad del mecanizado, con la finalidad de evitar errores de fabricación que desarrollen señales de vibraciones de modos de falla que no deben existir. Para cada práctica de laboratorio se ha elaborado su respectiva guía, así como también el manual de usuario de la aplicación VISUALspectrum.

Después de realizar una comparación estadística entre las mediciones del analizador de vibraciones VIBRACHECK 200 ABG y la aplicación VISUALspectrum, se obtuvo como resultado coeficientes de variación menores, validando a la aplicación VISUALspectrum como una herramienta eficaz para análisis de vibraciones y adicionalmente de bajo costo para la Facultad de Mecánica.

ABSTRACT

This thesis designed and implemented a modular development of vibration analysis laboratory practice; the modular consists of a software application and simulators of failure modes. The informatics application "VISUALspectrum" has been designed using the software (LabVIEW) Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench, containing the most relevant characteristics of a vibrations Analyzer, with a very friendly interface for the user inspired by the MAINtraq Viewer software.

To determine the characteristics of "VISUALspectrum" the content of the given subject in class was studied about vibration analysis, resulting in the need of an application which delivers wave forms and spectrums of the magnitude of displacement, speed and acceleration as well as of the surrounding.

Simulators of failure modes have been designed and built for practices with particular attention to material selection and the quality of machining, in order to avoid making manufacturing mistakes that develop vibrations signs of failure modes that must not exist. For each lab practice has been prepared both its respective guide, and VISUALspectrum application user's manual.

After performing a statistical comparison between the measurements of vibrations VIBRACHECK 200 ABG analyzer and the application VISUALspectrum, resulted in lower variation coefficients, validating to the VISUALspectrum application as an effective tool for the analysis of vibration and additionally of lower cost for the Faculty of Mechanics.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En la actualidad es importante considerar que uno de los grandes retos que la mayoría de industrias tiene es buscar métodos para lograr altos índices de productividad, optimizando recursos de tal manera que se logre alcanzar los objetivos empresariales. La necesidad de tener máquinas en óptimas condiciones de funcionamiento hace que muchas industrias busquen constantemente técnicas modernas con el fin de poder anticiparse a las fallas.

El mantenimiento industrial junto a la tecnología han demostrado su constante evolución, es muy común encontrar instrumentos cada vez más sofisticados que se convierten en grandes aliados al momento de aplicar mantenimiento predictivo, la interpretación y las acciones a tomar sobre las máquinas y elementos más críticos para buscar prevenir fallas que amenacen su correcto funcionamiento.

Los avances tecnológicos en la industria y los altos estándares de producción, han llevado al mantenimiento a desarrollar técnicas no destructivas, como el análisis de vibraciones, para detectar fallas potenciales en las máquinas rotativas, mediante el seguimiento de las mismas, estableciendo tendencias y prediciendo la ocurrencia de la falla funcional, permitiendo que el departamento de mantenimiento pueda actuar y planificar a tiempo la intervención con los mínimos efectos que estos causan.

1.2 Justificación

Todas las máquinas rotativas generan vibraciones como acción normal de su funcionamiento, sin embargo cuando falla alguno de sus componentes, las características de estas vibraciones cambian y debido a la complejidad de éstas señales, es necesario descomponerlas mediante la transformación de la señal en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia a través de la Transformada rápida de Fourier. Las manifestaciones de las vibraciones están asociadas a la relación existente entre desplazamiento, velocidad y aceleración. Las variables de desplazamiento, velocidad, aceleración y envolvente son las claves para entender rápidamente un

espectro o un reporte de análisis de vibración. Las frecuencias que podemos observar en un espectro son: frecuencias bajas donde se detectan problemas de desbalance, desalineación, ejes doblados y holgura; frecuencias medias se detecta resonancias estructurales que son propias del tipo de construcción de la máquina, frecuencias se detecta fallas superficiales de los componentes dinámicos (DOMINGUEZ, 2013).

Actualmente existen equipos analizadores de vibraciones y software, que entregan gráficas de señales de vibraciones en el dominio del tiempo y de la frecuencia. A pesar de que existe en inventario un equipo de adquisición de señales de vibración de la National Instruments, la aplicación informática desarrollada en el software LabVIEW que trabaja con este equipo ofrece información muy limitada para el análisis espectral.

Para contribuir en la mitigación de este problema, en el presente trabajo de graduación se pretende integrar un conjunto de simuladores armables y configurables, en un solo módulo maestro capaz de simular cinco modos de falla mecánicos de distinta índole en un solo ambiente de trabajo. Conjuntamente se programará en un software de adquisición de datos e instrumentación electrónica, una nueva aplicación informática para los equipos de adquisición de señales de vibración existente, lo que permita analizar las señales de vibraciones en el dominio del tiempo o de la frecuencia.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo general.* Desarrollar de una aplicación informática para adquisición y análisis de señales de vibraciones de modos de falla mecánicos.

1.3.2 *Objetivos específicos:*

Analizar las necesidades del laboratorio y desarrollar una aplicación informática de análisis de vibraciones con las características que suplan éstas necesidades.

Desarrollar un modular de simulación de modos de falla mecánicos.

Transferir y adaptar tecnología moderna de sistemas de instrumentación en el sector educativo para análisis de vibraciones.

Elaborar guías prácticas del laboratorio de vibraciones, guía de operación del software y manual de mantenimiento del modular.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Vibración

Según la norma ISO 2041: 2009, “Vibración y Choques - Vocabulario”, define a la vibración como: “Oscilación mecánica sobre un punto de equilibrio. Las oscilaciones pueden ser periódicas o aleatorias” (ISO 2041, 2009).

Es decir es el movimiento oscilatorio de un cuerpo entorno a su punto de equilibrio, el cual es producido por una fuerza de excitación. Cuando la fuerza que actúa sobre el cuerpo es cero éste volverá a su punto de equilibrio.

2.2 Origen de las frecuencias de vibración

Las frecuencias pueden originarse de diferentes maneras, así tenemos:

2.2.1 Frecuencias generadas. Identificadas también como frecuencias forzadas que genera el equipo durante su funcionamiento normal, típicas de éstas tenemos a las frecuencias causadas por el desbalanceo, el paso de álabes de una turbina, la frecuencia de engranaje o el paso de los elementos rodantes (GARCIA, 2014).

2.2.2 Frecuencias originadas por fenómenos externos a la máquina. Se deben a la vibración ocasionada por máquinas circundantes a la máquina de interés que generan fuerzas en la misma (GARCIA, 2014).

2.2.3 Frecuencias originadas por fenómenos electromagnéticos. En ocasiones es el generador acoplado a una turbina, o el motor eléctrico el responsable de las vibraciones. En estos casos se aprecia alguna relación con la frecuencia de la red eléctrica (GARCIA, 2014).

2.2.4 Frecuencia natural. Depende de las características estructurales de la máquina tales como la masa, rigidez y amortiguamiento, incluyendo los soportes y tuberías. Al coincidir las frecuencias naturales con las frecuencias de excitación, éstas se amplifican y se produce el fenómeno de la resonancia (GARCIA, 2014).

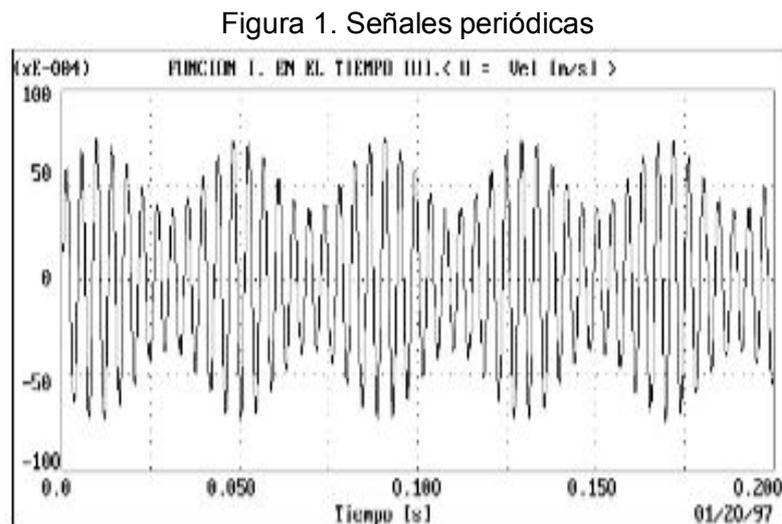
2.3 Tipos de señales

Las señales son la respuesta del sistema vibratorio al estar bajo la presencia de una fuerza excitadora, es decir el sistema vibratorio recibe una señal excitadora de entrada (fuerza) y arroja una señal de respuesta (señal de vibración).

Según la norma ISO 2041:2009, "Vibración y Choques - Vocabulario"; clasifica a las señales de vibración como periódicas o aleatorias.

2.3.1 Señales periódicas. Tienen formas de ondas con un patrón que se repite a igual distancia en el tiempo completándose un ciclo en cada intervalo (WHITE, 2010).

Los sistemas físicos reales pueden estar sometidos a la acción simultánea de más de una fuerza excitadora generando una señal compleja resultado de la combinación de señales simples presentes en la máquina más golpeteos intermitentes y aleatorios.



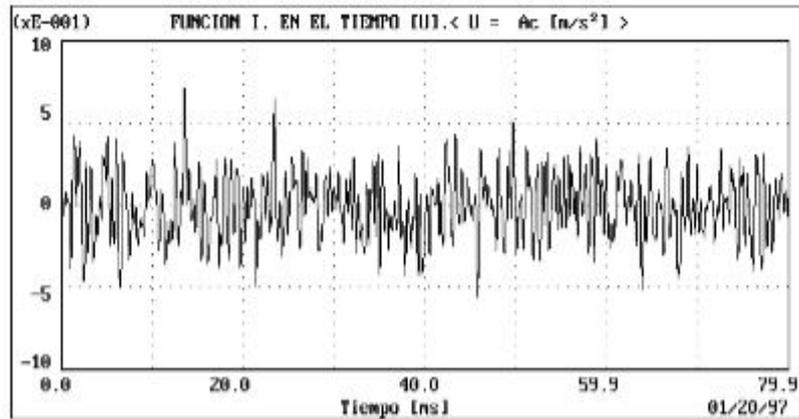
Fuente: PALOMINO, 2007

2.3.2 Señales aleatorias. Son señales muy fluctuantes, sus valores instantáneos futuros son impredecibles dando un mayor o menor grado de incertidumbre, se pueden describir en términos estadísticos y promediados.

"El valor de la excitación en un momento dado no se puede pronosticar, se puede describir solo en funciones de cantidades estadísticas" (SINGIRESU, 2012).

Se asocian por lo general a cavitación, problemas de lubricación y contacto metal - metal en elementos rodantes.

Figura 2. Señales aleatorias



Fuente: PALOMINO, 2007

2.4 Elemento de una onda

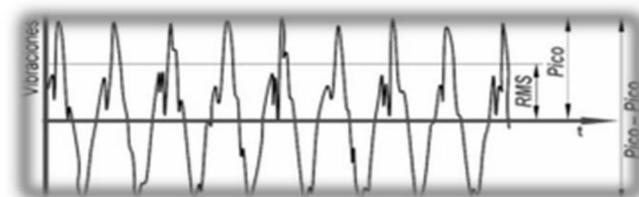
Una onda está compuesta de los siguientes elementos:

2.4.1 Amplitud. Es la magnitud de la vibración o la cantidad de desplazamiento, velocidad o aceleración de la vibración, medida desde el valor en reposo. La amplitud de una señal de vibración se puede expresar en términos de:

- Pico-pico: es la diferencia entre el valor máximo positivo y máximo negativo de la señal de vibración.
- Pico: indica la distancia entre el punto de referencia o equilibrio y el máximo alcanzado por la señal.
- Nivel RMS: indica la raíz cuadrada del promedio de los cuadrados de los valores de la señal (ISO 2041, 2009).

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{(V1)^2 + (V2)^2 + \dots + (VN)^2}{N}} \quad (1)$$

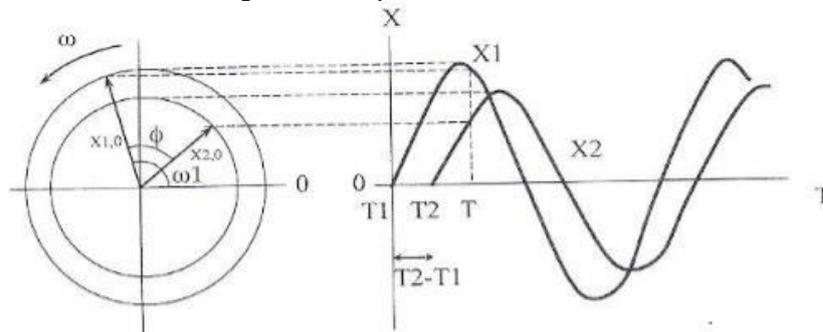
Figura 3. Magnitudes de amplitud



Fuente: WHITE, 2010

2.4.2 Fase. Es una medida de la diferencia de tiempo entre dos ondas sinodales. Aunque la fase es una diferencia verdadera de tiempo, siempre se mide en términos de ángulos, en grados o radianes (WHITE, 2010).

Figura 4. Representación de fase

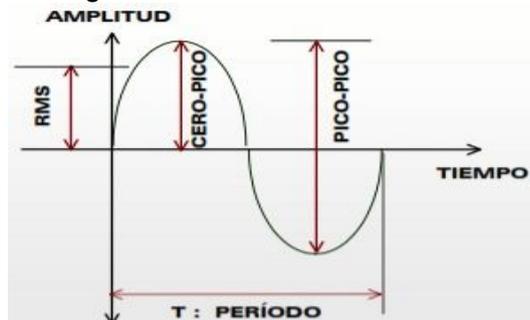


Fuente: GONZÁLEZ, 2010

2.4.3 Periodo. El periodo es el tiempo necesario para un completar un ciclo completo y se mide en segundos o milisegundos (WHITE, 2010).

2.4.4 Frecuencia. Es el recíproco del periodo ($f = 1/T$) y significa el número de oscilaciones completas por unidad de tiempo, se expresa en ciclos por minuto (cpm) ó Hertz (A-MAQ, 2005).

Figura 5. Elementos de una onda



Fuente: A-MAQ S.A. 2010

2.5 Magnitudes de la vibración

La vibración puede ser expresada en las siguientes magnitudes:

2.5.1 Desplazamiento. Es la distancia total que describe el recorrido desde un extremo a otro, su unidad es la micra ($\mu\text{m} = 0,001 \text{ mm}$) en el Sistema Internacional y 0,001 plg en el Sistema Inglés. El desplazamiento determina la magnitud de la vibración (WHITE, 2010).

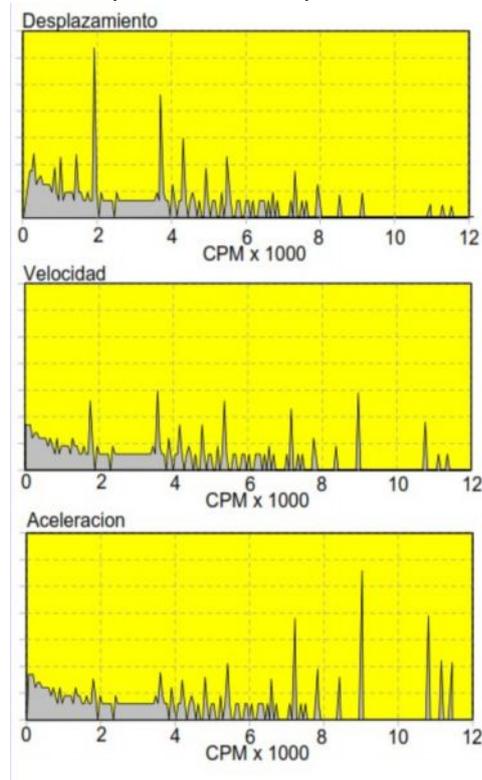
“Las medidas de desplazamiento son especialmente en vibración de baja frecuencia, o cuando el analista necesita conocer el movimiento completo de un eje determinado, y se las tomarán con un transductor de desplazamiento” (GARCIA, 2014).

2.5.2 Velocidad. Se define como la proporción de cambio en el desplazamiento, su unidad en el Sistema Internacional es mm/s y en el Sistema Inglés plg/s. La velocidad tiene un avance sobre el desplazamiento en un ángulo de 90° de fase y determina la severidad de la vibración (WHITE, 2010).

Los análisis en la magnitud de velocidad son las de mayor campo de aplicación al ser directamente proporcional al esfuerzo y al desgaste de un sistema mecánico. La medida de velocidad permite reconocer la mayoría de los patrones de fallas primarias y de otros componentes cuando están en un estado evidente (GARCIA, 2014).

2.5.3 Aceleración. Se define como la proporción de cambio en la velocidad se mide en gravedades (g) y equivale a 9806,65 mm/s² en el Sistema Internacional y en el Sistema Inglés 386,08 plg/s². La aceleración tiene un avance sobre la velocidad en un ángulo de 90° de fase y determina la magnitud de la fuerza de vibración (WHITE, 2010).

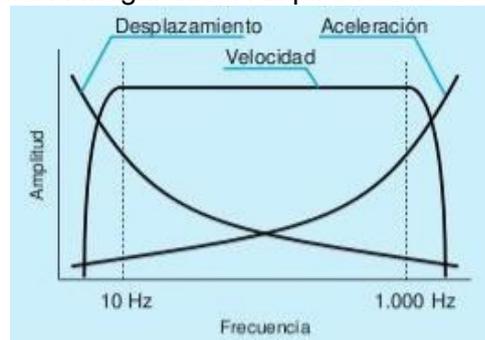
Figura 6. Comportamiento espectral del desplazamiento, velocidad y aceleración



Fuente: WHITE, 2010

Las unidades de amplitud para representar las señales obtenidas, tienen gran influencia en la claridad con la cual se manifiestan los fenómenos vibratorios. Siendo el desplazamiento ideal para bajas frecuencias por debajo de los 10 Hz, la velocidad para frecuencias intermedias dentro de los 10 Hz y 1000 Hz, y por último la aceleración para frecuencias mayores a 1000 Hz (SINAIS, 2013).

Figura 7. Magnitudes: Amplitud vs Frecuencia



Fuente: www.sinais.es/Recursos/Curso-vibraciones/fundamentos/magnitudes.html

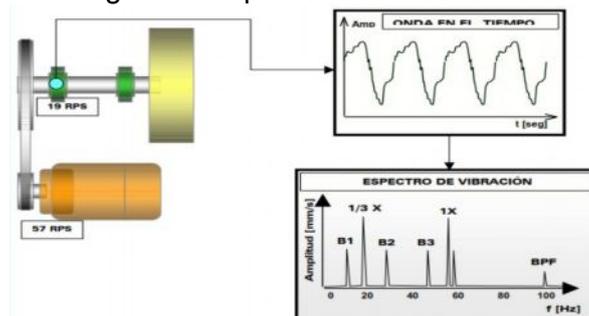
2.6 Representación de la vibración

La vibración puede representarse tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia.

2.6.1 Representación en el dominio del tiempo. La vibración representada en el dominio del tiempo es útil para saber si la máquina tiene un problema pero no determina donde (GARCIA, 2014).

2.6.2 Señales en el dominio de la frecuencia. Este análisis pretende descomponer una señal compleja en componentes más sencillas en el dominio de la frecuencia. La frecuencia describe el elemento y la amplitud describe la severidad del el problema (GARCIA, 2014).

Figura 8. Representación de la vibración



Fuente: A-MAQ, 2010

2.7 Transformada de Fourier

Descompone una señal en sus componentes fundamentales, la que puede ser continua en $\omega \in (-\infty, \infty)$ o discreta para señales en $\omega \in (0, \omega_s)$, la señal $x[n]$ tiene una transformada de Fourier que viene dada por la ec. (4):

$$X(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] e^{-j\omega n}; \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\omega n} \quad (2)$$

2.7.1 Transformada discreta de Fourier. También conocida como DFT es empleada para analizar las frecuencias presentes en la señal muestreada, resolver ecuaciones diferenciales entre otras operaciones. La DFT puede calcularse de forma eficiente mediante el algoritmo de la Transformada rápida de Fourier o FFT (OPPENHEIM, 2011).

Considere ahora la secuencia de N números complejos $X = x_0, x_1, \dots, x_{N-1}$, los cuales son muestra de una señal analógica. Tal secuencia debe transformarse en la secuencia de N números complejos $F = F_0, F_1, \dots, F_{N-1}$, las cuales son muestra del espectro de la señal analógica según la ec. (2).

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\omega_n n}; \omega_n = \frac{2\pi}{N} k; k = 0, \dots, N-1 \quad (3)$$

Comparando la ecuación (2) con la definición de la DFT se puede ver que:

$$X[k] = X(\omega_k) \text{ donde } \omega_k = \frac{2\pi k}{N}, k = 0, \dots, N-1 \quad (4)$$

Es decir los N valores de la DFT son muestras de $X(\omega_k)$ de la señal $x[n]$.

2.7.2 Transformada rápida de Fourier. También conocida como FFT es un método rápido para calcular la DFT y su inversa. Consideramos la secuencia de N números complejos $X = x_0, x_1, \dots, x_{N-1}$, la cual debe transformarse en la secuencia de N números complejos $F = F_0, F_1, \dots, F_{N-1}$ según la fórmula de la ec. (2). La FFT consiste en la descomposición de la transformada en otras más simples y éstas a su vez en otras más simples hasta llegar a transformadas de 2 elementos ($N = 2$). Una vez resueltas las transformadas más simples hay que agruparlas en otras de nivel superior que deben resolverse de nuevo y así sucesivamente hasta llegar al nivel más alto, al final de este proceso los resultados deben reordenarse (OPPENHEIM, 2011).

2.8 Normativas de vibraciones

Las normativas internacionales son estándares creados y aprobados que regulan las vibraciones mecánicas con la finalidad de evaluar la severidad vibratoria presente en un equipo industrial.

Minuciosos estudios realizados a través de muchos años sobre el tema, han permitido establecer niveles de alarma y peligro acerca de cuándo una vibración se convierte en amenaza para la máquina en sí y para su entorno (ISO 10816-1, 1995).

Actualmente son varias las asociaciones que han determinado diferentes normativas que ayudan a definir la severidad de una vibración, a continuación indicaremos algunas de las principales:

Tabla 1. Normativas de vibraciones

Organización	Normas	Descripción
ISO	2373 : 1974	<ul style="list-style-type: none"> Vibración mecánica en máquinas con velocidades de funcionamiento de 10 a 200 rev/s. Ésta normativa es aplicable para motores eléctricos de corriente alterna trifásica y a motores de corriente continua con altura de eje entre 80 y 400 mm.
	3945 : 1985	<ul style="list-style-type: none"> Vibración mecánica de grandes máquinas rotativas con rango de velocidad de 10 a 200 rev/s - Medición y evaluación de la severidad de la vibración in situ.
	10816-1 :1995	<ul style="list-style-type: none"> “Vibración mecánica - Evaluación de la vibración en una máquina mediante medidas en partes no rotativas”. Esta normativa reemplazo a la ISO 2373 e ISO 3945.
UNE	95 010 : 86	<ul style="list-style-type: none"> Características relativas a los transductores electromecánicos destinados a la medida de choques y vibraciones. “Vibración y choques: Terminología”
API	670 : 1993	<ul style="list-style-type: none"> Monitorización en tiempo real y la protección de maquinaria crítica.
ANSI	AS 2526 : 2003	<ul style="list-style-type: none"> Vibración Mecánica: Evaluación de una máquina medida en partes no rotativas. Ésta parte y ha sido reproducido a partir de la IO 10816 : 1995
Recomendaciones del fabricante		<ul style="list-style-type: none"> Al adquirir un equipo es muy necesario contar con información y recomendaciones propias del fabricante que indiquen los niveles de vibración permisibles, con la finalidad de preservar el activo.

Fuente: www.sinais.es/Recursos/Curso-vibraciones/normativa/resumen_normativas.html

2.8.1 Normas de severidad de vibraciones. Las normativas de severidad de las vibraciones están destinadas a analizar algunos tipos de equipos bajo ciertas condiciones. Las variables del movimiento que se consideran son el desplazamiento, velocidad y aceleración.

2.8.2 Norma ISO 10816-1:1995. “Vibración mecánica - Evaluación de la vibración mecánica mediante mediciones en partes no rotativas Parte 1 - Lineamientos Generales”.

La ISO 10816-1 es una normativa que determina las condiciones y procesos para evaluar las vibraciones en partes no rotativas de una máquina y proporciona un estándar contenido en seis partes que se aplican a diferentes tipos de máquinas, según muestra la Tabla 2.

Tabla 2. Partes de la Norma 10816-1:1995

Estándar	Tipo de Máquina
Parte 1	Procesos generales para varias clases de máquinas en base a medidas realizadas en partes no rotativas.
Parte 2	Turbinas de vapor y generadores que superen los 50 MW.
Parte 3	Máquinas industriales con potencias nominales por encima 15 kW y velocidades nominales entre 120 y 15000 rpm.
Parte 4	Conjuntos movidos por turbinas de gas.
Parte 5	Máquinas hidráulicas con potencia nominal sobre 1 MW y velocidad entre 120 a 1800 rpm.
Parte 6	Conjunto de máquinas reciprocantes con potencia mayor a 100 kW.

Fuente: Norma ISO 10816, “Vibración Mecánica”, 1995

2.8.3 Criterios de evaluación. La norma ISO 10816-1 establece dos criterios para evaluar la severidad de la vibración en diferentes clases de máquinas.

- Criterio I: Magnitud de la vibración

Define los límites para la magnitud de la vibración con aceptables cargas dinámicas sobre los descansos. La magnitud máxima de vibración se evalúa en cuatro zonas típicas establecidas de la siguiente manera:

Zona A: Las máquinas con vibración dentro de esta zona se consideran normalmente aquellas recién puestas en funcionamiento.

Zona B: Las máquinas con vibraciones dentro de esta zona, pueden funcionar indefinidamente sin restricciones.

Zona C: Las máquinas con vibraciones dentro de esta zona se consideran normalmente insatisfactoria para un funcionamiento continuo a largo plazo. En general, la máquina puede funcionar durante un periodo limitado en esta condición hasta que surja una oportunidad adecuada para las medidas correctivas.

Zona D: Los valores de vibración dentro de esta zona son normalmente considerados de gravedad suficiente como para causar daños a la máquina.

La vibración de una máquina en particular depende de su tamaño, las características del cuerpo vibrante y el sistema de montaje. En la mayoría de los casos, se ha encontrado que la velocidad de vibración es suficiente para caracterizar la severidad de la vibración en un amplio intervalo de velocidades de operación de la máquina (ISO 10816-1, 1995).

Para aplicar el criterio es necesario conocer el nivel global de la velocidad de vibración en valores rms, en un rango de frecuencia de 10 y 1000 Hz. Lo siguiente es clasificar a la máquina dentro de la clase correspondiente según la Tabla 3. Luego se evalúa la máquina de acuerdo a la Tabla 4 y se establecen los límites de las zonas para las clases de máquinas definidas anteriormente.

Tabla 3. Clasificación de las máquinas según la ISO 10816 -1

Clase	Descripción
CLASE I	Máquinas pequeñas de hasta 15 kW.
CLASE II	Máquinas de tamaño medio de 15 kW a 75 kW, o hasta 300 kW.
CLASE III	Máquinas grandes por encima de 75 kW con cimentación rígida.
CLASE IV	Turbo-máquinas, generadores y turbinas de gas superiores a 10 MW.

Fuente: Norma ISO 10816 -1, 1995

Tabla 4. Criterios de evaluación según la velocidad de vibración

R.m.s Velocidad de Vibración (mm/s)	Clases de Máquinas			
	Clase I	Clase II	Clase III	Clase IV
0,18 a 0,28	A			
0,28 a 0,45				
0,45 a 0,71				
0,71 a 1,12				
1,12 a 1,8	B			
1,8 a 2,8				
2,8 a 4,5	C			
4,5 a 7,1				
7,1 a 11,2	D			
11,2 a 18				
18 a 28				
28 a 45				

A	B	C	D
Buena	Satisfactoria	Insatisfactoria	Inaceptable

Fuente: Norma ISO 10816 -1, 1995

- Criterio II: Cambio en la magnitud de la vibración

Evalúa el cambio en la magnitud de la vibración de un valor de referencia previamente establecido. Tales cambios pueden ser instantáneos o progresivos con el tiempo y pueden indicar que se ha producido un daño o alguna irregularidad en el sistema.

Cuando se aplica el criterio II, las mediciones de vibración que se comparan se tomarán en el mismo lugar, en la misma orientación del transductor y en aproximadamente las mismas condiciones de funcionamiento de la máquina (ISO 10816-1, 1995).

2.9 Transductores de vibración

El transductor es el elemento que transforma la vibración mecánica en una señal eléctrica analógica, para ser procesada, medida y analizada. Existen varios tipos de transductores que responden a parámetros diferentes (WHITE, 2010).

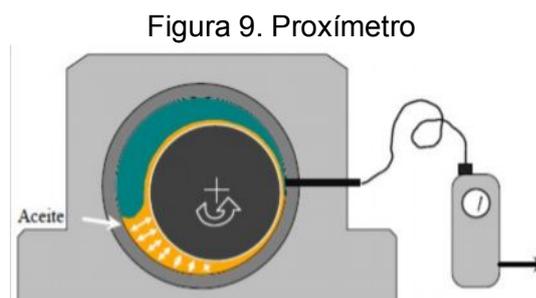
Tabla 5. Tipos de transductores

Tipo	Sensibles a:
Transductor de desplazamiento o sonda de proximidad	Desplazamiento
Transductor sísmico de velocidad o sonda de velocidad	Velocidad
Transductor piezoeléctrico o acelerómetro	Aceleración

Fuente: GARRIDO, 2014

2.9.1 Transductor de desplazamiento. También conocido como transductor de corriente Eddy, su principio de funcionamiento se basa en la generación de un campo magnético que al ser absorbido por el movimiento dinámico del eje envía una señal de salida la cual es acondicionada.

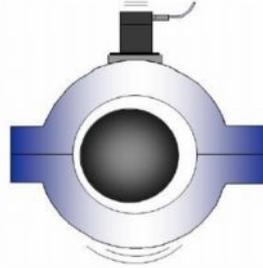
Se instalan sobre la superficie del eje en la cubierta y captan el movimiento relativo entre el eje y la punta del sensor (GARCIA, 2014).



Fuente: WHITE, 2010

2.9.2 Transductor sísmico de velocidad. Su principio de funcionamiento está basado en la fuerza electromotriz producida por el movimiento relativo de un imán permanente dentro de las bobinas del sensor, captando la vibración que el eje transmite a la carcasa. Este tipo de sensor viene con un amplificador de señal interno que integra la señal y la transforma a unidades de velocidad (DAZA , 2007).

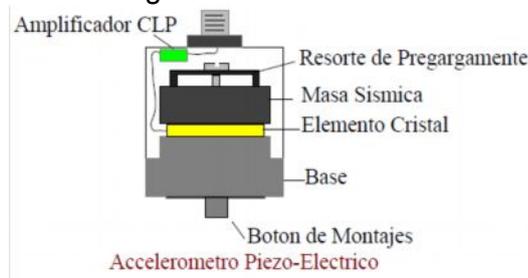
Figura 10. Transductor sísmico



Fuente: DAZA, 2007

2.9.3 Transductor piezoeléctrico. También conocido como acelerómetro, éste sensor genera una señal proporcional a la aceleración debido a la deformación de un cristal piezoeléctrico causada por la fuerza aplicada por una masa en dirección de su polarización (DAZA , 2007).

Figura 11. Acelerómetro



Fuente: WHITE, 2010

2.10 Software LabVIEW

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es un software de lenguaje de programación gráfica, para el diseño de sistemas de adquisición de datos, instrumentación y control. Cuenta con un panel frontal que es la interfaz con el usuario y un diagrama de bloques donde se realiza la programación, la cual cuenta con varias librerías de funciones y subrutinas, además de las funciones básicas de todo lenguaje de programación LabVIEW incluye librerías específicas para adquisición de datos, control de instrumentación, comunicación serial, análisis, presentación y guardado de datos (NATIONAL INSTRUMENTS, 2011).

2.10.1 Interfaz de LabVIEW. Los programas desarrollados en LabVIEW son llamados instrumentos virtuales (VIs), porque su apariencia y funcionamiento imitan los de un instrumento real. Los VIs tienen una parte interactiva con el usuario y otra parte de código fuente y aceptan parámetros procedentes de otros VIs.

Todos los VIs tienen un panel frontal y un diagrama de bloques. Las paletas contienen las opciones que se emplean para crear y modificar.

Figura 12. Pantallas LabVIEW



Fuente: TUTORIAL LABVIEW, 2003

- **Panel frontal.** Es la interfaz del usuario con el VI, aquí se construye el panel frontal con controles e indicadores. Los controles simulan instrumentos de entrada de equipos y suministran datos al diagrama de bloques del VI. Los indicadores simulan salidas de instrumentos y suministran datos que el diagrama de bloques adquiere o genera. Cada control o indicador del panel frontal tienen un terminal correspondiente en el diagrama de bloques (NATIONAL INSTRUMENTS, 2011).
- **Diagrama de bloques.** Contiene el código fuente gráfico, donde los objetos del panel frontal aparecen como terminales en el diagrama de bloque. Adicionalmente, el diagrama de bloques contiene funciones y estructuras incorporadas en las bibliotecas de LabVIEW VI. Los cables conectan a cada uno de los nodos en el diagrama de bloques incluyendo controles e indicadores de terminal, funciones y estructuras. Los cables unen entradas y salidas con los objetos correspondientes y por ellos fluyen los datos (NATIONAL INSTRUMENTS, 2011).
- **Paleta de herramientas.** Se emplea tanto en el panel frontal como en el diagrama de bloques. Contiene herramientas necesarias para editar y depurar los objetos tanto del panel frontal como del diagrama de bloques (NATIONAL INSTRUMENTS, 2011).

- *NI Sounds and vibration assistant.* El simulador de herramientas de sonido y vibración es una colección de instrumentos virtuales para LabVIEW, que se pueden utilizar para realizar las mediciones típicas requeridas por audio, acústica, y aplicaciones de vibración. Se puede realizar mediciones en datos digitalizados y/o simulados (NATIONAL INSTRUMENTS, 2004).

- *DAQ assistant.* Permite adquirir y generar señales utilizando NI-DAQ, en el caso de adquirir señales analógicas de vibración nos permite seleccionar el modo de adquisición de señales, el rango de voltaje de nuestra tarjeta de adquisición de datos, la escala de la unidad, la sensibilidad del acelerómetro, la frecuencia de muestreo y el número de muestras entre otras.

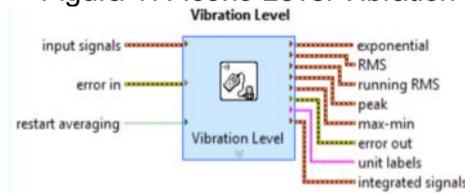
Figura 16. Icono DAQ assistant



Fuente: TUTORIAL LABVIEW, 2011

- *Level Vibration.* Recibe la señal y tiene la opción de integrarla una o dos veces seleccionando el tipo de unidad, también entrega valores de rms, pico, pico-pico, running rms y exponencial.

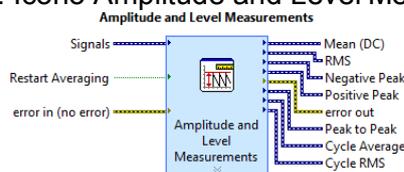
Figura 17. Icono Level Vibration



Fuente: TUTORIAL LABVIEW, 2011

- *Amplitude and Level Measurements.* Muestra los valores calculados de las mediciones según se configure esta función (rms, máximo pico, mínimo pico, pico-pico, ciclo de promedio, ciclo rms).

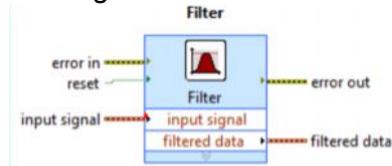
Figura 18. Icono Amplitude and Level Measurements



Fuente: TUTORIAL LABVIEW, 2011

- *Filter*. Filtra señales de tiempo usando una respuesta al impulso infinita (IIR) o una respuesta al impulso finita (FIR). Ésta función elimina o atenúa las frecuencias no deseadas de una señal utilizando varios tipos de filtros estándar.

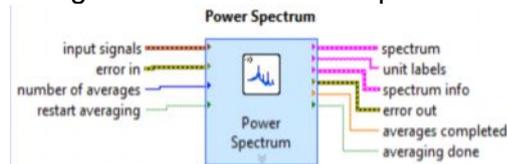
Figura 19. Icono Filter



Fuente: TUTORIAL LABVIEW, 2011

- *Power Spectrum*. Calcula la potencia del espectro, la densidad espectral y permite elegir la magnitud entre rms, pico, pico-pico y seleccionar el tipo de escala.

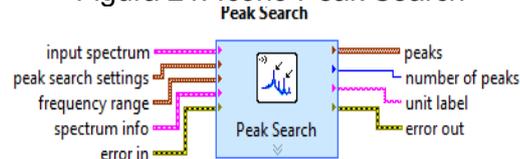
Figura 20. Icono Power Spectrum



Fuente: TUTORIAL LABVIEW, 2011

- *Peak Search*. Busca el número de espectros en el dominio de la frecuencia y se puede configurar su búsqueda con un rango de frecuencia y amplitud.

Figura 21. Icono Peak Search



Fuente: TUTORIAL LABVIEW, 2011

- *While Loop*. Ejecuta las acciones que estén situadas dentro del bucle hasta que reciba un valor booleano específico.

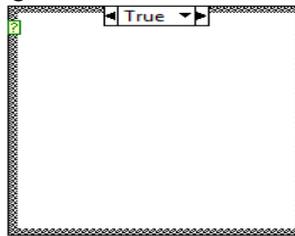
Figura 22. Icono While Loop



Fuente: TUTORIAL LABVIEW, 2011

- *Case structure*. Es una estructura que contiene varios subdiagramas y permite elegir un curso de acción o ejecuta el contenido del subdiagrama dependiendo del valor de entrada que se ejecute.

Figura 23. Case Structure



Fuente: TUTORIAL LABVIEW, 2011

2.10.2 Teorema del muestreo. La forma de onda debe ser muestreada lo suficientemente rápido para producir un registro de tiempo digitalizado que represente fielmente la forma de onda original. La velocidad mínima aceptable se denomina velocidad de Nyquist (MARTÍN, 2006).

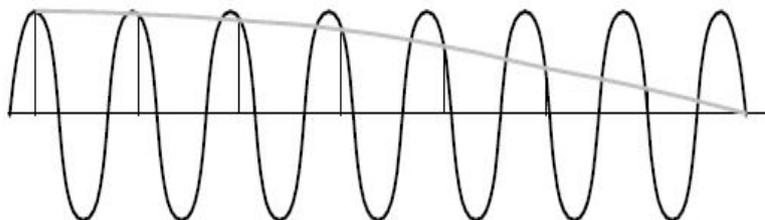
$$f_s = 2f_{\text{máx}} \quad (5)$$

f_s = Frecuencia de muestreo

$f_{\text{máx}}$ = Frecuencia más alta presente en la señal

2.10.2.1 Aliases. Es un efecto causado por la digitalización de una señal con una frecuencia de muestreo menor al doble a la máxima esperada. En la reconstrucción de la señal se obtiene una representación con frecuencia mucho menor a la real (WHITE, 2010).

Figura 24. Aliases, frecuencia de muestreo menor que la frecuencia de la señal

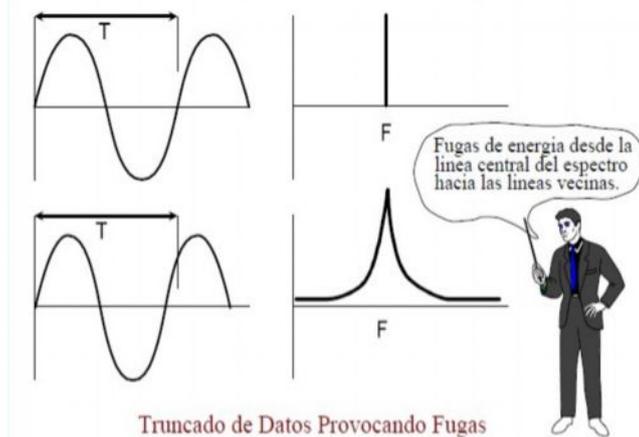


Fuente: WHITE, 2010

2.10.2.2 Filtro anti-aliasing. Es un filtro analógico paso bajo con una frecuencia de corte menor a la mitad de la frecuencia máxima de la señal. El filtrado se lo realiza antes de la digitalización de señal (WHITE, 2010).

2.10.2.3 Fugas. Este fenómeno se produce cuando se discretiza una señal con un número no entero de ciclos en el tiempo de grabación, es decir la señal inicia y termina con un valor de amplitud diferente de cero. Para solucionar este fenómeno coloca una ventana antes de aplicar el algoritmo de la Transformada rápida de Fourier.

Figura 25. Efecto fuga



Fuente: WHITE, 2010

2.10.3 Ventanas. Una ventana es un multiplicador de una señal de dominio de tiempo y cuyo propósito es remover o suavizar las discontinuidades que existen al principio y fin de nuestra muestra.

Las ventanas de nuestro interés por su uso en el análisis de vibraciones son las siguientes:

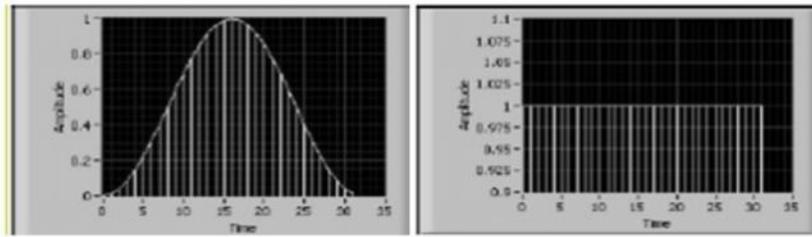
2.10.3.1 Ventana Hanning. Es la ventana más utilizada en procesamiento de señales digitales. Las muestras en el tiempo se ponderan mediante la función Hanning, proporcionando una transición suave a cero en los extremos del registro de tiempo.

Proporciona la mejor resolución en frecuencia que las demás ventanas a costa de la reducción de la exactitud de la amplitud (MARTÍN, 2006).

2.10.3.2 Ventana Rectangular. También llamada ventana uniforme, no altera las muestras es equivalente a no utilizar ninguna ventana (MARTÍN, 2006).

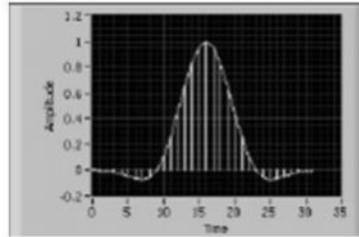
2.10.3.3 Ventana Flat top. Se considera muy precisa en amplitud mientras que la resolución en la frecuencia es menor que en el caso de la función Hanning. Es una ventana con una banda de paso más plana y reduce las diferencias en amplitud entre las muestras minimizando el error en amplitud (MARTÍN, 2006).

Figura 26. a) Ventana Hanning, b) Ventana Rectangular y c) Ventana Flat top



a)

b)



c)

Fuente: www.ehu.es/daq_tutorial/Doc/indicegeneral.htm

CAPÍTULO III

3. DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN PARA ANÁLISIS VIBRACIONAL

Para el desarrollo de las prácticas en el tema “Análisis de vibraciones” dentro de la asignatura Mantenimiento Predictivo de la Escuela de Ingeniería de Mantenimiento, se cuenta con un instrumento de medición de la vibración (VIBRAcheck 200), el mismo que viene con varios software para el análisis de las vibraciones, de los cuales se ha enfocado en MAINTraQ Viewer.

3.1 Determinación de las características del software

El presente trabajo emulará ciertas características del software con el objetivo que al estudiante se le asemeje la utilización de ambos programas.

3.1.1 Determinación de la información que necesita el laboratorio. En clases se tratan temas acerca de los efectos vibracionales, los cuales el estudiante puede comprender mediante el análisis espectral en las magnitudes de desplazamiento, velocidad, aceleración y envolvente.

En el análisis espectral se puede observar espectros característicos de los distintos modos de fallo en donde la frecuencia indica el tipo de fallo y la amplitud su gravedad, por lo que se considera indispensable que la aplicación informática entregue dicha información (ver Tabla 6).

Tabla 6. Información que proporcionará la aplicación

Parámetros	Formas de onda	Espectro
Desplazamiento	x	x
Velocidad	x	x
Aceleración	x	x
Envolvente	x	x

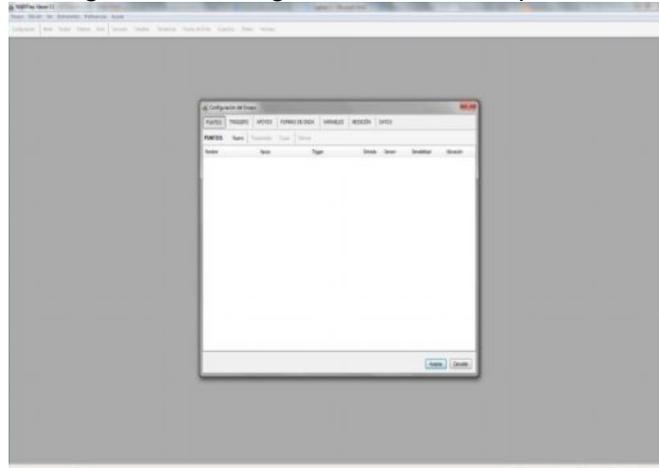
Fuente: Autores

3.1.2 Análisis de la interfaz del software MAINTraQ Viewer. El laboratorio cuenta con éste programa para realizar análisis en tiempo real, por lo que la aplicación a desarrollarse deberá conservar las características más relevantes. MAINTraQ Viewer cuenta con una configuración previa del ensayo a medir, donde se configuran apoyos, puntos, formas de onda y variables que se desean observar según lo requerido.

Pasos para adquisición de datos en el MAINTraq Viewer:

a) Abrir MAINTraq Viewer, Ensayo, Nuevo.

Figura 27. Configuración MAINTraq Viewer

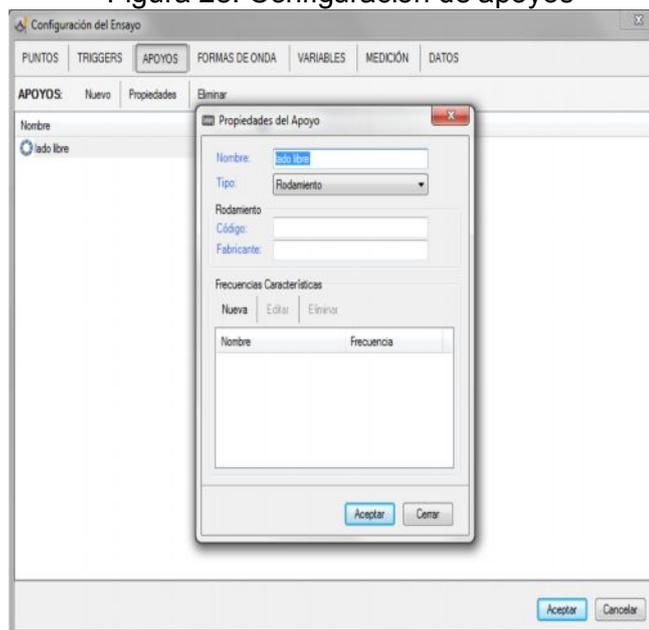


Fuente: Autores

b) Configurar el apoyo donde se va a realizar la medición (ver Figura 28), se configuran las características principales del apoyo y es recomendable ingresar el tipo de rodamiento que se está utilizando.

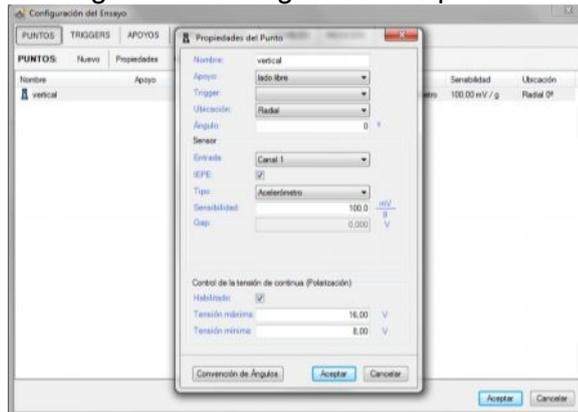
c) Configurar el punto donde se colocará el o los acelerómetros y el canal en el que están conectados al VIBRAcheck 200 (ver Figura 29).

Figura 28. Configuración de apoyos



Fuente: Autores

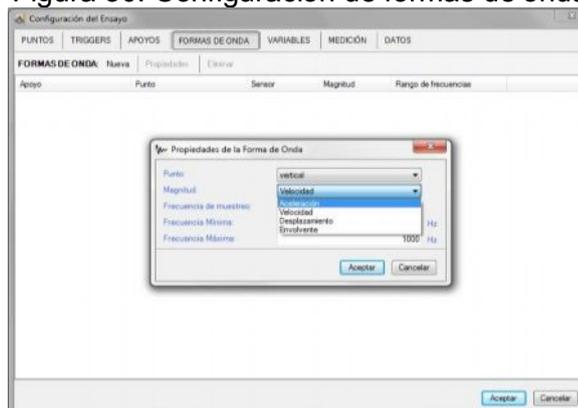
Figura 29. Configuración de puntos.



Fuente: Autores

d) Configurar la forma de onda que se desea observar de los puntos configurados anteriormente y escoger la magnitud que se desea analizar. Al momento de medir los datos solo se observarán las ondas escogidas.

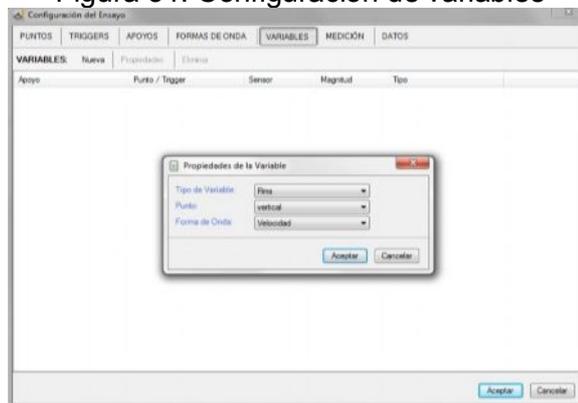
Figura 30. Configuración de formas de onda



Fuente: Autores

e) Seleccionar las variables de los puntos y las formas de onda

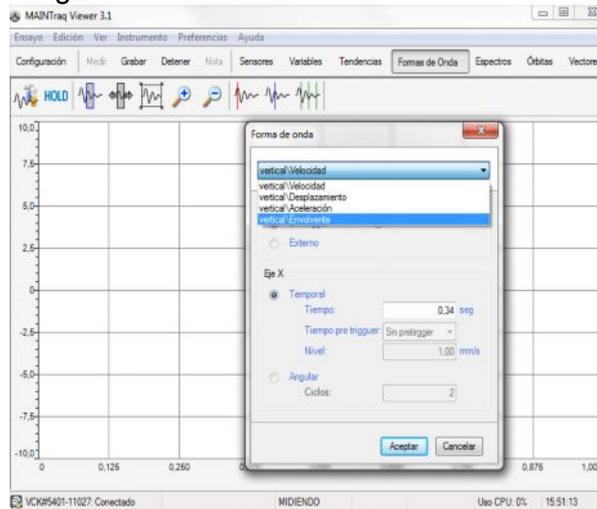
Figura 31. Configuración de variables



Fuente: Autores

f) Después de configurados estos parámetros se procede a medir, conectando el VIBRAcheck 200 a la computadora. Si se desea ver las formas de onda se debe hacer clic en el icono “Formas de Onda”, seleccionando la magnitud que se necesite analizar en la medición.

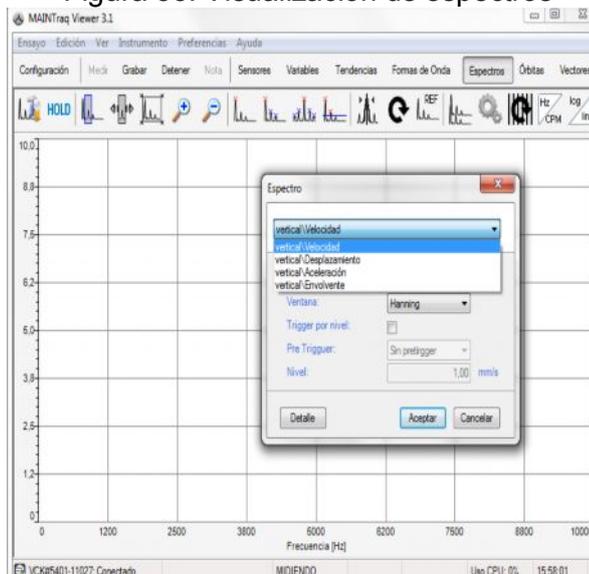
Figura 32. Visualización de formas de onda



Fuente: Autores

g) Para observar los espectros se abre el menú donde se configura el tipo de ventana (Rectangular, Hanning, Flat top), por defecto siempre se usa la tipo Hanning.

Figura 33. Visualización de espectros



Fuente: Autores

En ambas opciones el software cuenta con herramientas para realizar análisis en tiempo real, dichas herramientas se describen en la Tabla 7.

Tabla 7. Herramientas del software MAINTraq Viewer

Herramientas	Formas de onda	Espectros
	Configura la forma de onda a visualizar	Configura el espectro a visualizar
	Detiene la presentación de las formas de onda (aunque el sistema continua midiendo)	Detiene la presentación del espectro (aunque el sistema continua midiendo)
	Selecciona la zona de la forma de onda que se desea magnificar	Selecciona la zona del espectro que se desea magnificar
	Magnifica a la zona de la forma de onda seleccionada	Magnifica a la zona del espectro seleccionada
	Ajusta las escalas para que la forma de onda se encuadre en la pantalla	Ajusta las escalas para que el espectro se encuadre en la pantalla
	Disminuye la escala vertical	Disminuye la escala vertical
	Aumenta la escala vertical	Aumenta la escala vertical
	Muestra u oculta el cursor principal	
	Muestra u oculta el cursor secundario	
	Muestra u oculta el cursor periódico	
		Muestra u oculta el cursor principal
		Muestra u oculta el cursor de armónicas
		Muestra u oculta el cursor de banda laterales
		Muestra u oculta el cursor de picos principales

Fuente: Autores

3.2 Análisis de las características técnicas de los equipos de medición

Los equipos de medición utilizados tienen las siguientes características técnicas:

3.2.1 Módulo NI-9234. El módulo NI 9234 posee cuatro canales cada uno con un filtro anti-aliasing integrado y autoajutable a la velocidad de muestreo con una velocidad máxima de muestreo de 51,2 kS/s. También cada entrada posee un acoplamiento AC/DC (capacitor), que nos permitirá ver pequeñas variaciones de voltaje y mejorar la resolución en la medición de la señal. La tarjeta trabaja en un rango de ± 5 V y tiene una resolución de 24 bits, lo que hace que la señal obtenida se represente con una mayor precisión a la señal original y trabaja en un rango de operación de temperatura de -40°C a 70°C .

Figura 34. Módulo NI 9234



Fuente: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/209893>

3.2.2 Chasis NI cDAQ - 9171. Es una chasis NI compact DAQ USB de una ranura que trabaja en conjunto con módulos de la serie C de NI, como lo es el módulo NI-9234. Dispone de distintos tipos de funcionamiento como E/S analógicas, E/S digitales, contadores/temporizadores de entrada y salida de 32 bits. Su comunicación hacia la computadora es mediante puerto USB. Su rango de entrada de voltaje es de 4,75 V - 5,25 V y el rango de temperatura de operación es de - 20 °C a 55 °C.

Figura 35. Chasis NI cDAQ-9171



Fuente: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/209817>

3.2.3 Acelerómetro PCB modelo 603C01. Es un sensor piezoeléctrico que tiene una sensibilidad de 100 mV/g \pm 5 % en otras palabras si el nivel de vibración es de 1 g producirá 100 mV de tensión de salida, su rango de medición es de \pm 50 g. El sensor mide datos de vibración desde 0,5 Hz - 10 000 Hz y entra en resonancia a 25 kHz, la resolución cuando el sensor trabaja en un rango de 1 Hz - 10 000 Hz es de 350 μ g, su temperatura de operación es - 54 °C a 121 °C. El tiempo de establecimiento del sensor es \leq 2 s, es decir el tiempo en que el amplificador se estabiliza (ver Anexo A).

Figura 36. Acelerómetro PCB modelo 603C01



Fuente: <http://www.pcb.com/Products.aspx?m=EX603C01>

3.3 Determinación del alcance de la aplicación

El alcance de la aplicación depende de las características del hardware (sensores piezoeléctricos, tarjeta de adquisición de datos) detalladas anteriormente y de las ventajas del software LabVIEW.

La aplicación trabajará con una frecuencia de muestreo de 25.6 KS/s obedeciendo el teorema de muestreo ya que la frecuencia máxima esperada será de 10kHz, dentro de un rango de 5 Hz – 10 kHz. La señal sensada será una onda de aceleración por lo que mediante integración se podrá obtener las ondas de velocidad, desplazamiento y mediante demodulación se obtendrá la onda de envolvente.

Los espectros de todas las formas de onda se presentarán en su respectiva gráfica dentro de los rangos de frecuencia de la Tabla 8 tomados de referencia del software MAINTraQ Viewer y de la Norma ISO 10816-1 para la magnitud de velocidad.

Las variables que entregará la aplicación son rms, pico-pico y pico, además se podrá seleccionar entre las ventanas Hanning, Rectangular y Flat top para visualizar los espectros. La aplicación tendrá la capacidad de trabajar con tres acelerómetros simultáneamente que serán colocados en los apoyos en dirección radial horizontal, radial vertical y axial.

Tabla 8. Alcance de la aplicación a desarrollarse

Parámetros	Frecuencia (Hz)	Forma de onda	Espectro
Desplazamiento	5-200	Pico-pico	Rms
Velocidad	10-1000	Rms	Rms
Aceleración	5-10000	Rms	Rms
Envolvente	Configurable	Pico-pico	Rms
Variables			
Desplazamiento	Rms	Pico	Pico-pico
Velocidad	Rms	Pico	Pico-pico
Aceleración	Rms	Pico	Pico-pico
Envolvente	Rms	Pico	Pico-pico
Ventanas			
Desplazamiento	Hanning	Rectangular	Flat top
Velocidad	Hanning	Rectangular	Flat top
Aceleración	Hanning	Rectangular	Flat top
Envolvente	Hanning	Rectangular	Flat top

Fuente: Autores

3.4 Diseño de la aplicación en LabVIEW 2012

La aplicación cumplirá características similares al software MAINTraQ Viewer.

3.4.1 Diseño del panel frontal. El panel frontal ha sido inspirado en la interfaz del software MAINTraQ Viewer y se denominará “**VISUALspectrum**”.

Figura 37. VISUALspectrum



Fuente: Autores

La aplicación cuenta con cuatro pestañas principales: la primera pestaña lleva el nombre de acelerómetro 1 y se muestra por defecto al abrir la aplicación, la segunda y tercera pestaña corresponden a los acelerómetros 2 y 3. Las tres pestañas mantienen la misma interfaz y programación en donde cada una corresponde a los acelerómetros conectados desde el canal 0 hasta el canal 2 de la DAQ. En la cuarta pestaña se encuentra la guía de usuario y un documento de apoyo.

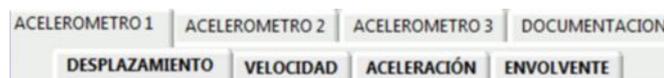
Figura 38. Pestañas principales VISUALspectrum



Fuente: Autores

Dentro de las pestañas acelerómetro 1, acelerómetro 2 y acelerómetro 3; existen cuatro subpestañas que corresponden a las magnitudes en las que se desea analizar la forma de onda y el espectro.

Figura 39. Subpestañas VISUALspectrum



Fuente: Autores

En estas subpestañas hay tres botones para iniciar, congelar y detener.

Figura 40. Controles de medición



Fuente: Autores

Se dispone también de dos ventanas: configuración y espectros (ver Figura 41).

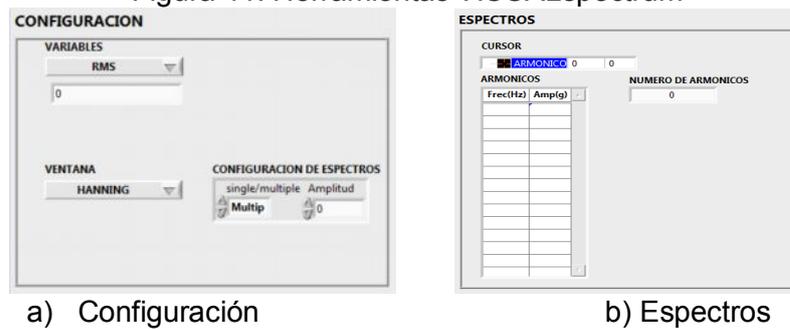
En el panel configuración se puede seleccionar y configurar:

- Variables: rms, pico-pico, pico
- Ventanas: Hanning, Rectangular, Flat top
- Configuración de espectros

En el panel de espectros se puede visualizar y ubicar:

- Cursor
- Número de armónicos
- Armónicos

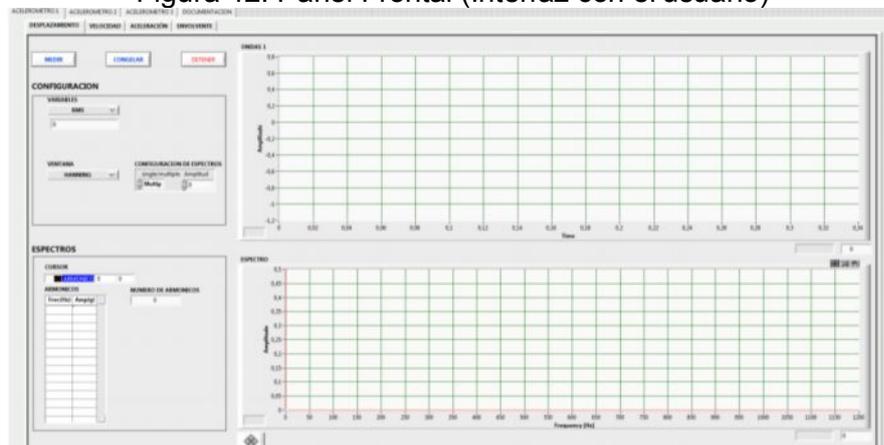
Figura 41. Herramientas VISUALspectrum



Fuente: Autores

La aplicación cuenta con un visualizador gráfico superior para las formas de ondas y un visualizador gráfico inferior para los espectros, en donde se podrá analizar también sus respectivas unidades y valores (ver Figura 42).

Figura 42. Panel Frontal (Interfaz con el usuario)



Fuente: Autores

Por último en la pestaña documentación (ver Figura 43), existen dos botones vinculados cada uno a un archivo en formato PDF que servirá de apoyo en la realización de las prácticas:

- Cartas de Charlotte
- Guía de usuario

Figura 43. Pestaña Documentación

FUENTE DEL PROBLEMA	ESPECTRO TÍPICO	RELACIÓN DE FASE
DESEQUILIBRIO DE MASA A. DESEQUILIBRIO ESTÁTICO	1X RADIAL 	
B. DESEQUILIBRIO TIPO PAR	1X RADIAL 	

Fuente: Autores

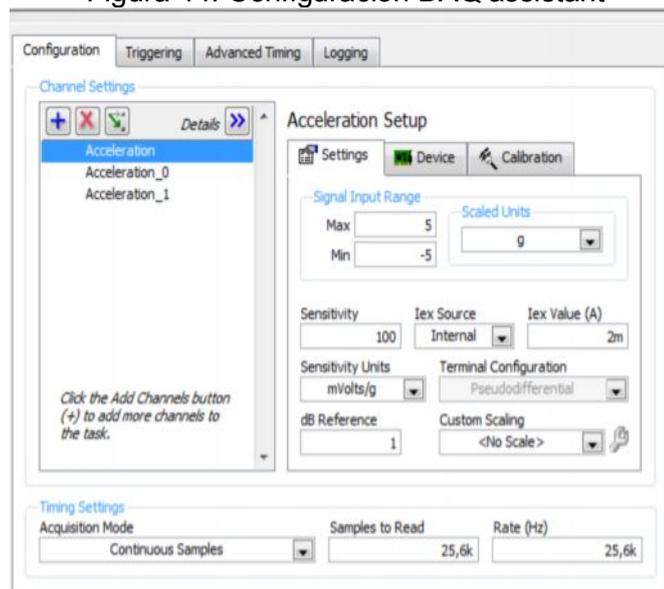
3.4.2 *Diseño del diagrama de bloques.* Aquí se encuentran los terminales de los controles e indicadores del panel frontal, funciones, Vis, cableado y estructuras etc., usados en la programación de la aplicación.

3.4.2.1 *Configuración de la DAQ assistant.* Para empezar con el diseño de la aplicación se configurarán los parámetros de la DAQ assistant que controlará la adquisición de la señal. Primero se configura como adquirir señales y luego se selecciona la variable aceleración.

- *Signal Input Range.* En la sección 3.2.1 se manifestó que el rango de la DAQ NI 9234 es de ± 5 V, este valor viene por defecto al abrir la función DAQ assistant.
- *Scaled Units.* Por defecto viene seleccionada g y se mantiene esta configuración.
- *Sensitivity.* Este valor corresponde a la sensibilidad del acelerómetro, como se describió en la sección 3.2.3 la sensibilidad del acelerómetro es de 100 mV/g, por lo cual este valor se escribirá en el cuadro de diálogo para cada canal a usarse.
- *Sensitivity units.* Se selecciona mV/g que es la unidad del sensor usado.

- *Adquisition mode.* Se selecciona continuos samples para adquirir continuamente la señal.
- *Samples to read.* Es el número de muestras que va leer la DAQ NI 9234 para describir la señal adquirida, por lo cual se escribe 25600 muestras (ver Figura 44). Una vez establecida la frecuencia de muestreo de 25,6 kS/s y el número de muestras, la tarjeta adquiere la amplitud de la señal muestreada cada 0,000039 segundos, por lo tanto la señal se discretizará en periodos de 1 segundo.
- *Rate.* Aquí se ingresa el valor de la frecuencia de muestreo y se debe cumplir con el teorema de muestreo, como el acelerómetro tiene una capacidad máxima de 10 kHz, la frecuencia de muestreo es de 25,6 kS/s. Así con la f_s de 25,6 kS/s y con 25600 muestras se obtiene una resolución espectral de 1, para comprender la relación entre el número de muestras y la frecuencia de muestreo ver el Anexo B.

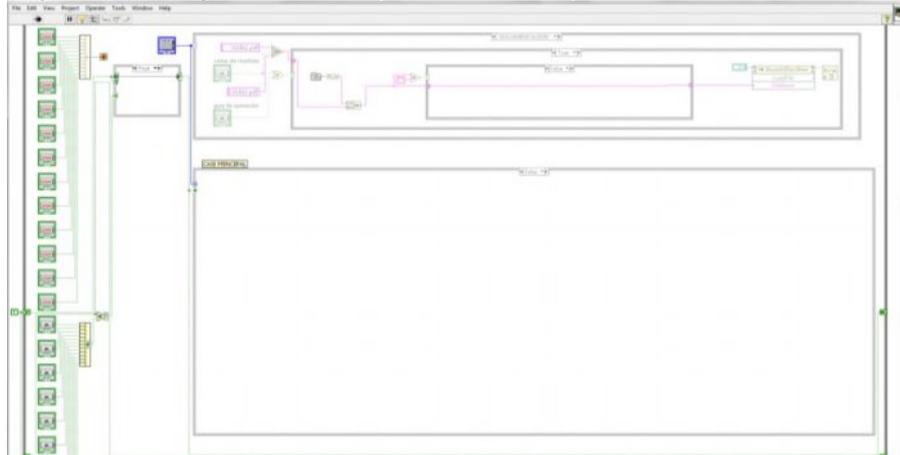
Figura 44. Configuración DAQ assistant



Fuente: Autores

3.4.2.2 Diagrama de bloques del panel frontal. Toda la programación se encuentra dentro de una estructura While Loop lo que significa que la programación se ejecutará hasta que reciba un valor booleano de 0 del stop button (detener). Dentro de esta estructura se hallan seis estructuras case las cuales poseen varios subdiagramas, la estructura case principal está condicionada a dos valores booleanos de T y F, cuando se manda a correr el programa sin presionar el ok button (medir) entonces se recibe un valor booleano F en el selector y procede a ejecutar el contenido del subdiagrama False, como se ve en la Figura 45 no sucede nada.

Figura 45. Diagrama de bloques sin haber presionado el botón Medir

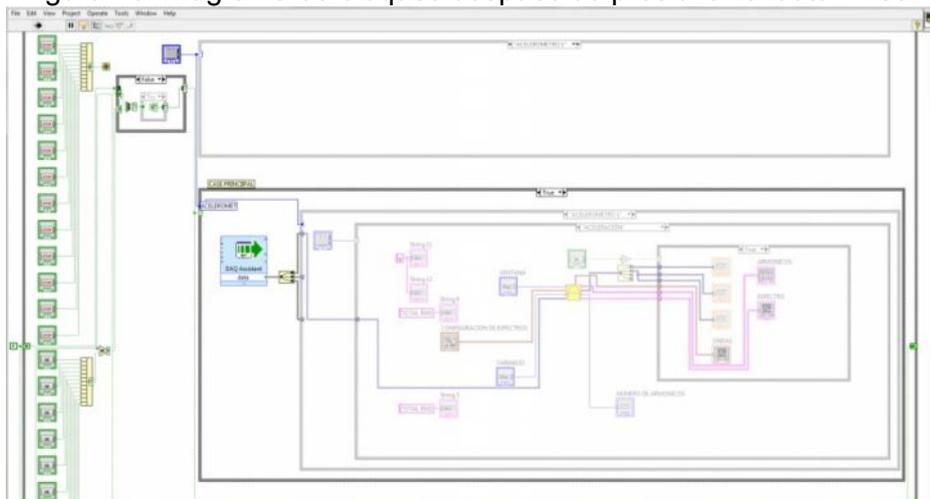


Fuente: Autores

Al presionar el botón medir la estructura case principal recibe el valor booleano T y ejecuta el contenido del subdiagrama true como se ve en la Figura 46, aquí se encuentra toda la programación.

En el subdiagrama true tenemos a la DAQ assistant y otra estructura case que recibe los valores de un tab control que contiene las pestañas principales que vemos en el panel frontal, al cambiar de pestaña en el panel frontal en el diagrama de bloques se ejecuta el contenido del subdiagrama seleccionado (acelerómetro 1, acelerómetro 2, acelerómetro 3 y documentación), como se ve en la Figura 47; se está ejecutando el subdiagrama del acelerómetro 1.

Figura 46. Diagrama de bloques después de presionar el botón Medir

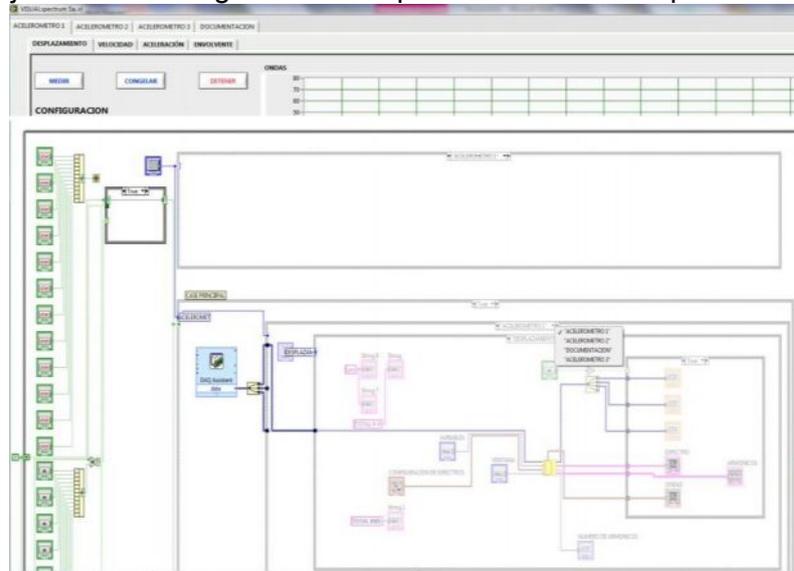


Fuente: Autores

A la vez existe una estructura case dentro de los subdiagramas acelerómetro 1, acelerómetro 2 y acelerómetro 3, ligado un tab control que corresponden a las

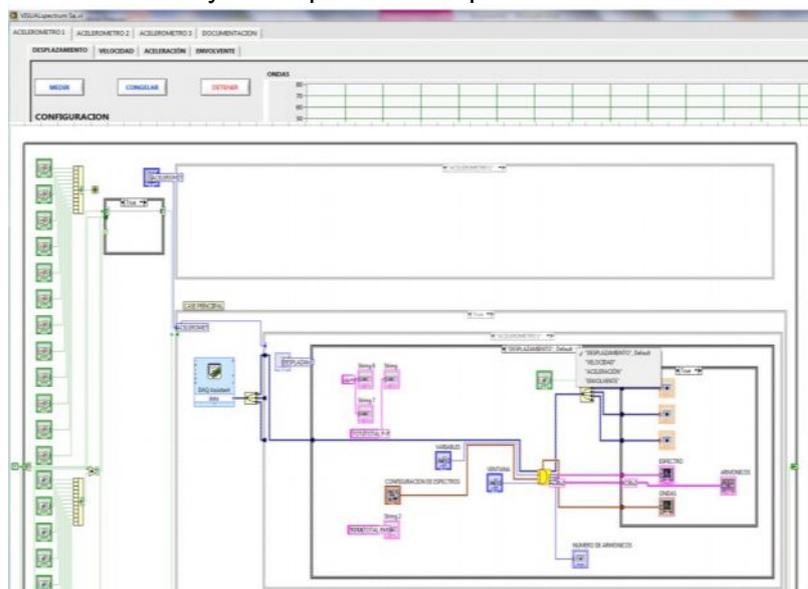
pestañas secundarias del panel frontal desplazamiento, velocidad, aceleración y envolvente y de la misma forma al cambiar de pestaña se ejecuta en el diagrama de bloques el contenido de ese subdiagrama (ver Figura 48).

Figura 47. Ejecución del diagrama de bloques seleccionada la pestaña acelerómetro 1



Fuente: Autores

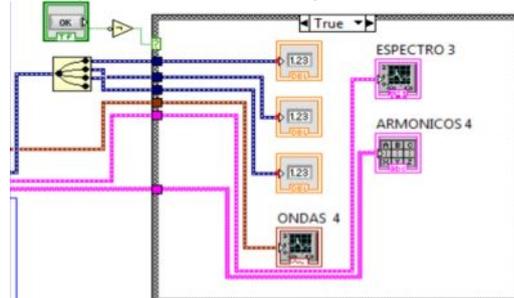
Figura 48. Ejecución del diagrama de bloques seleccionada la pestaña acelerómetro 1 y la subpestaña desplazamiento



Fuente: Autores

Se congela la pantalla mediante una estructura Case y un ok button (congelar) conectado al seleccionador de la estructura en conjunto con un función booleana de negación, al presionar el botón congelar los indicadores se congelan, pero el programa sigue ejecutándose normalmente.

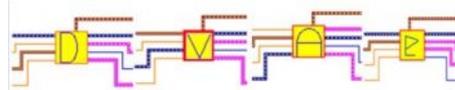
Figura 49. Configuración para congelar pantalla del panel frontal



Fuente: Autores

Dentro de los subdiagramas desplazamiento, velocidad, aceleración, envolvente se encuentra un SubVi o subrutina, que tiene terminales de entradas y salidas como se ve en la Figura 50. En las entradas se conectan la DAQ assistant, variables, ventana y configuración de espectros, mientras que en las salidas se conectan valor, espectro, armónicos, ondas y número de armónicos.

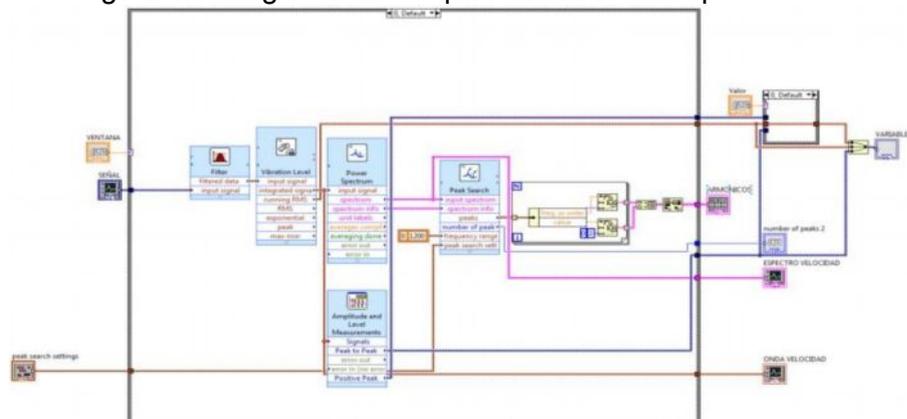
Figura 50. SubVis de desplazamiento, velocidad, aceleración, envolvente



Fuente: Autores

En el SubVI desplazamiento la señal recibida de la DAQ es filtrada mediante un filtro pasabanda de 5 - 200 Hz, luego se realiza una doble integración con la función Vibration Level de aquí se obtiene el valor rms y de la función Amplitude and Level Measurements se obtienen los valores pico y pico-pico. De la señal integrada se consiguen los espectros mediante la función Power Spectrum y con la función Peak Search se obtienen el número de espectros, la frecuencia y la amplitud. Se crean indicadores gráficos para Vibration Level y Power Spectrum.

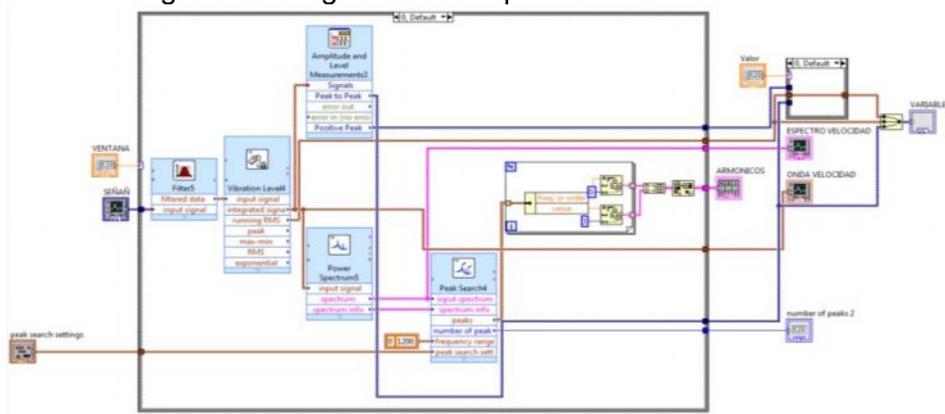
Figura 51. Diagrama de bloques del Sub VI Desplazamiento



Fuente: Autores

En el SubVI velocidad la señal adquirida de la DAQ es filtrada mediante un filtro pasabanda de 10 - 1000 Hz, después se realiza una integración simple con la función Vibration Level, de aquí se obtiene el valor rms y de la función Amplitude and Level Measurements se obtienen los valores pico y pico-pico. Con la función Power Spectrum se consiguen los espectros y con la función peak search se obtienen el número de espectros, la frecuencia y la amplitud. Se crean indicadores gráficos para Vibration Level y Power Spectrum.

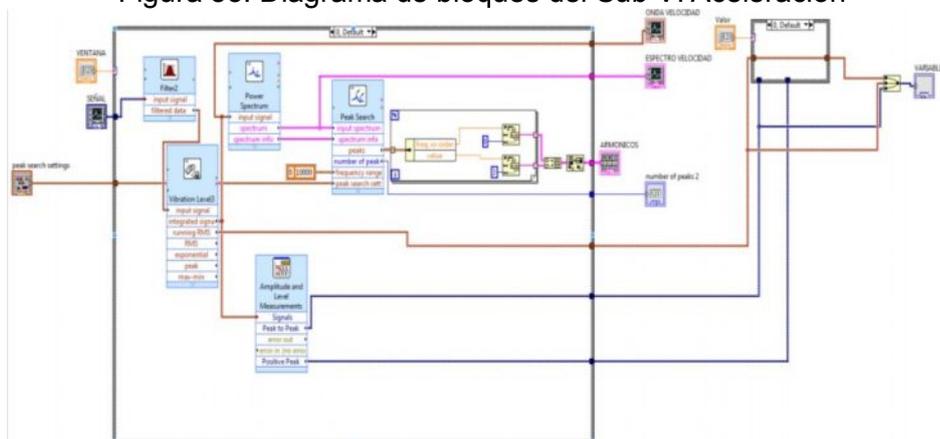
Figura 52. Diagrama de bloques del Sub VI Velocidad



Fuente: Autores

En el SubVI aceleración la señal recibida desde la DAQ es filtrada mediante un filtro pasabanda de 5 - 10k Hz, no se realiza ninguna integración con la función Vibration Level solo se obtiene el valor rms y con la función Amplitude and Level Measurements se obtienen los valores pico y pico-pico. Mediante la función Power Spectrum se consiguen los espectros y con la función Peak Search se obtienen el número de espectros, la frecuencia y la amplitud. Se crean indicadores gráficos para Vibration Level y Power Spectrum.

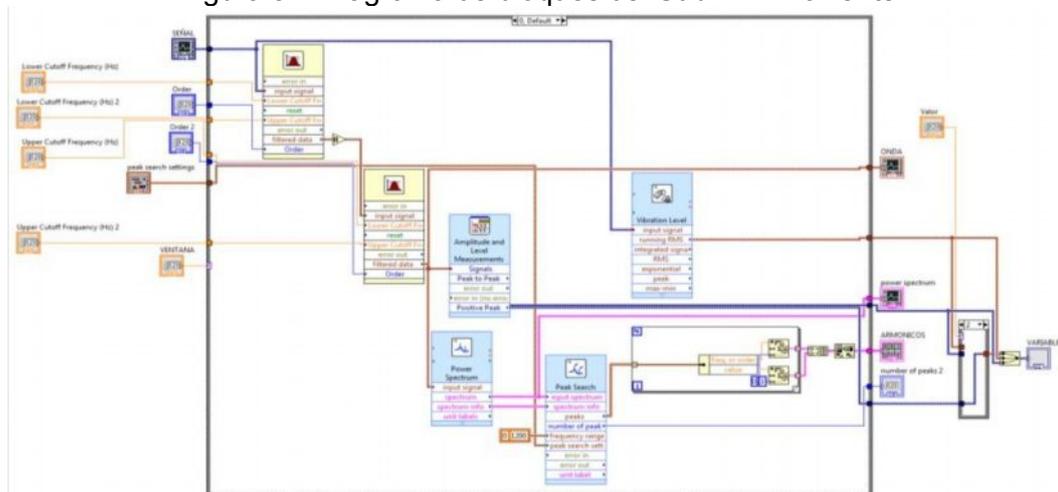
Figura 53. Diagrama de bloques del Sub VI Aceleración



Fuente: Autores

En el Sub VI envolvente la señal recibida desde la DAQ es filtrada mediante un filtro pasabanda, los valores del filtro deben ser ingresados desde el panel frontal y corresponden a la banda de frecuencia en la se encuentra la señal de interés, después se rectifica la señal y se vuelve a filtrar mediante otro filtro pasabanda, los valores de este filtro también deben ser ingresados desde el panel frontal antes de empezar a medir y corresponden a la banda de frecuencia de impactos, no se realizará ninguna integración con la función Vibration Level solo se obtiene el valor rms y con la función Amplitude and Level Measurements y se obtienen los valores pico y pico-pico. Mediante la función Power Spectrum se consiguen los espectros y con la función Peak Search se obtienen el número de espectros, la frecuencia y la amplitud.

Figura 54. Diagrama de bloques del Sub VI Envolvente



Fuente: Autores

CAPÍTULO IV

4. CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO DIDÁCTICO

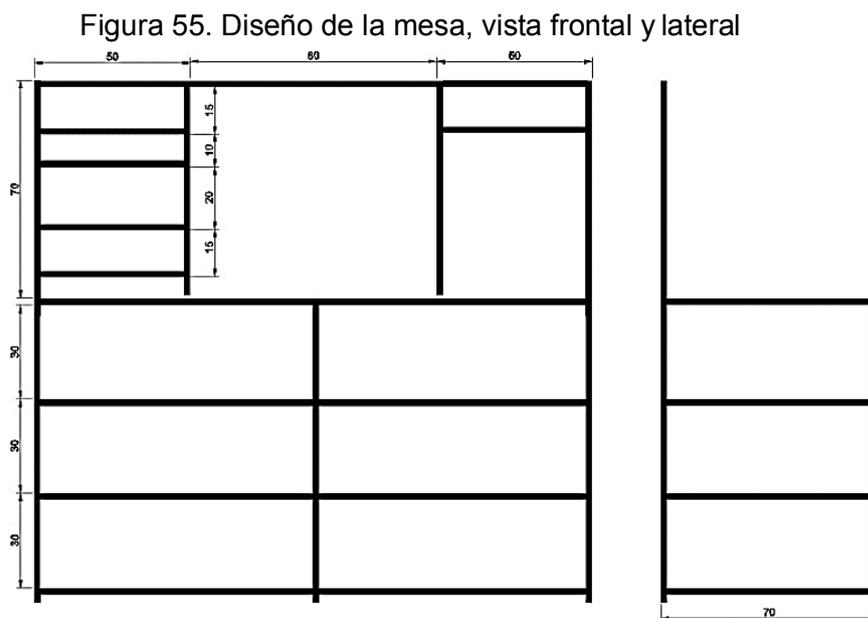
La implementación del modular didáctico para análisis de modos de falla ayudará a desarrollar las destrezas en una de las técnicas de diagnóstico más efectivas del mantenimiento predictivo como lo es el análisis de vibraciones.

4.1 Descripción general

El modular está compuesto de elementos mecánicos, eléctricos y electrónicos, de los cuales se puede obtener corriente monofásica y trifásica para el funcionamiento del equipo de cómputo y del motor respectivamente, también cuenta con repisas para el almacenamiento de los simuladores de modos de falla.

4.2 Construcción del modular didáctico

4.2.1 Diseño y construcción de la mesa. Para el diseño de la mesa se ha considerado las funciones que ésta debe cumplir, por lo que se distribuyó en zonas que garanticen la seguridad y optimización del tiempo en el desarrollo de las prácticas. La estructura está construida con tubo cuadrado para los soportes y el espaldar. Cuenta con 6 garruchas para un fácil transporte y se ha aplicado pintura al horno.



Fuente: Autores

Figura 56. Construcción de la mesa



Fuente: Autores

Zona A. La superficie apropiada para la realización de las prácticas a más de ser lisa, resistente a la corrosión y al desgaste; debe permitir montar y desmontar con facilidad los simuladores de modos de fallo. Según estas características se optó por usar una placa perfilada en aluminio anodizado marca Festo de dimensiones 1100x700x50 mm.

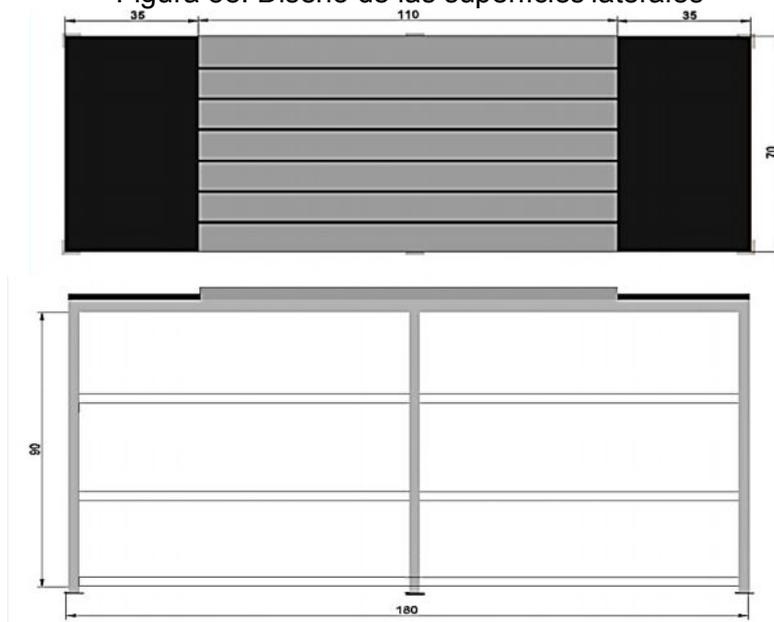
Figura 57. Placa perfilada de aluminio anodizado



Fuente: <http://www.festo-didactic.com/es-es/productos/equipos-de-practicas>

Zona B. Consta de dos superficies laterales construidas de tol negro situadas a los extremos de la estructura y sirven como bases de apoyo.

Figura 58. Diseño de las superficies laterales



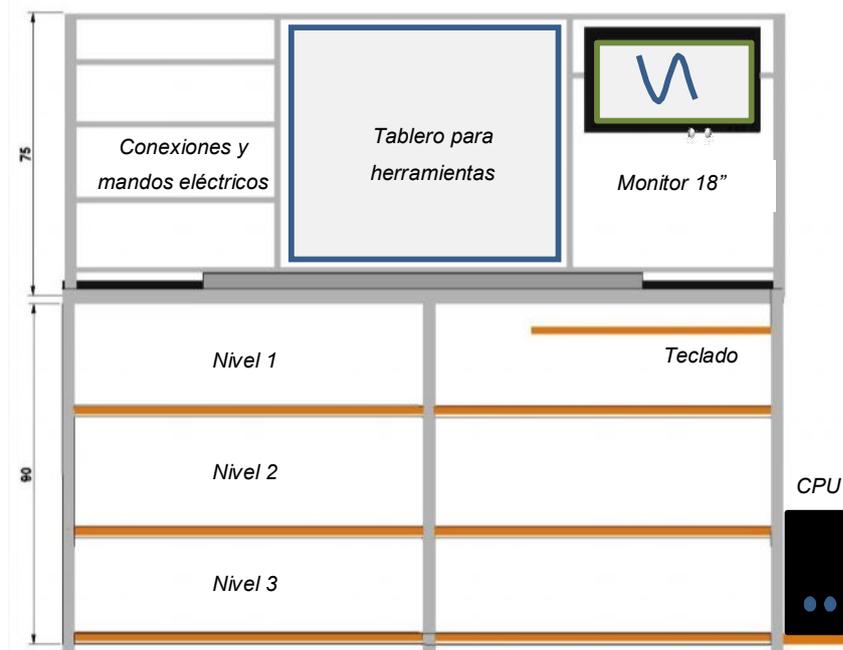
Fuente: Autores

Zona C. Para almacenar y organizar los simuladores de modos de fallo y equipos de análisis predictivo, se disponen de tres niveles separados por secciones que faciliten el acceso. La base de cada sección es de tabla triplex de 18 líneas y están aseguradas con pernos (ver Figura 59).

Zona D. La etapa de análisis de los datos adquiridos en cada práctica, se lo realiza por medio de la aplicación desarrollada VISUALspectrum, por lo que se requiere utilizar un computador con las siguientes características: Core i3 y 6 Gigas de memoria RAM.

El monitor está ubicado en el extremo derecho del espaldar a una altura de 1500 mm desde el suelo, el teclado y el mouse están ubicados sobre una repisa bajo la superficie lateral derecha a una altura de 880 mm desde el suelo, éstas alturas garantizan la comodidad del estudiante (ver Figura 59).

Figura 59. Diseño y distribución de la mesa

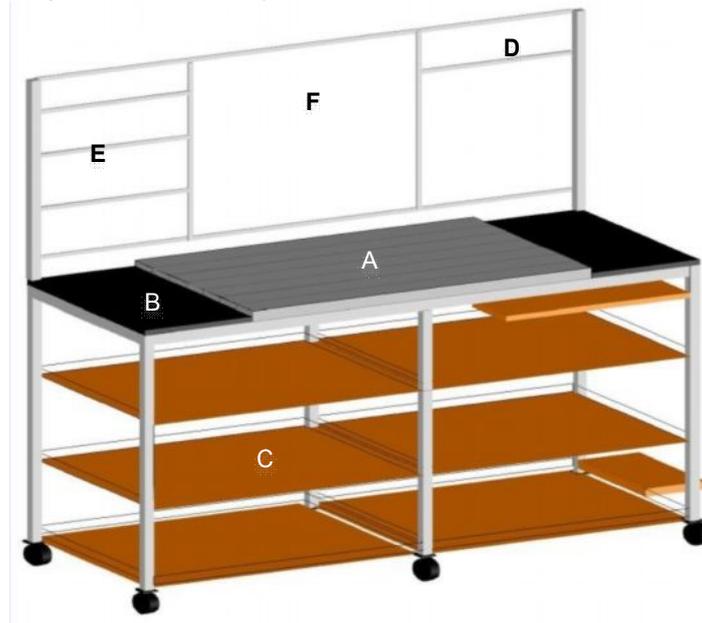


Fuente: Autores

Zona E. El modular cuenta con una caja de control, donde se encuentran los circuitos de mando, potencia, etc., se puede trabajar con corriente trifásica y monofásica esto se detalla en la sección 4.3.

Zona F. La optimización del tiempo en el montaje o desmontaje de los componentes es muy importante, es por esto que se dispone un tablero de herramientas que faciliten los procedimientos (ver Figura 60).

Figura 60. Diseño y distribución por zonas de la mesa



Fuente: Autores

4.3 Diseño y construcción de los simuladores de modo de falla

Los simuladores de modos fallo mecánicos están diseñados de tal manera que solo simulen la falla deseada y no otro modo de fallo introducido como consecuencia de algún defecto en su construcción, por tal motivo las placas bases están construidas con un acero AISI/SAE 1010 de bajo contenido de carbono fácilmente maquinable con un espesor de 11 mm obtenido después del proceso de rectificado de sus superficies, estas placas tendrán agujeros roscados los cuales servirán para fijarlas a la placa perfilada mediante pernos.

Los ejes están contruidos con un acero plata de 20 mm, éste acero viene rectificado y con un tratamiento de recocido. Las chumaceras empleadas son las p204, se trabaja con chumaceras por ser autoalineables y por su fácil lubricación, están situadas sobre bases de acero fijadas a las placas mediante pernos avellanados evitando así la deformación que produce la soldadura. Durante el armado final de los módulos se empleó la técnica de alineación laser con el fin de garantizar la misma. Las dimensiones de los simuladores se pueden ver en el Anexo C.

4.3.1 Base del motor y placa de desalineación. Este simulador cuenta con dos placas diferentes: la placa guía tiene un pin que sirve de eje para el desplazamiento angular de la placa de desalineación, en la misma están colocadas dos chumaceras y un eje sobre el cual están acoplados dos discos que simularán un cilindro. La placa guía se

fija a la placa perfilada mediante pernos y en la placa de desalineación va montado un motor eléctrico de 0,5 Hp que a través de las ranuras (ojos chinos) se puede mover en forma controlada mediante dos pernos con paso de 1 mm colocados en las partes laterales de la placa guía (ver Figura 61).

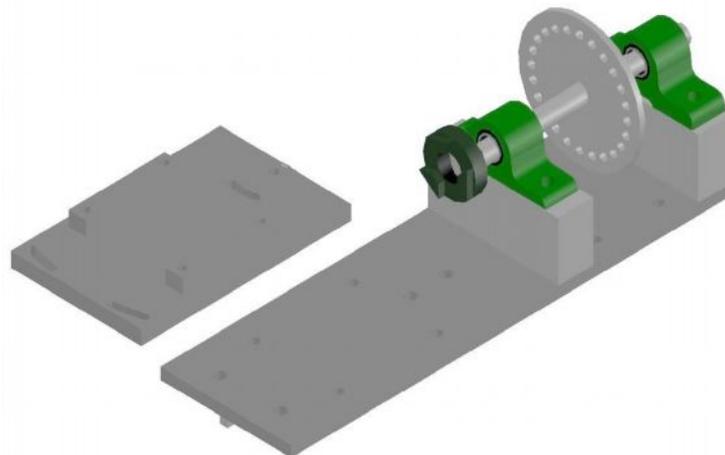
4.3.2 *Simulador de árbol elástico.* Este simulador cuenta con dos chumaceras, un cojinete de bronce, el cual se acopla a un motor eléctrico a través de un acople flexible tipo araña y se fija a la placa perfilada mediante pernos (ver Figura 62).

4.3.3 *Simulador de desbalanceo.* Este simulador cuenta con dos chumaceras, un eje y dos discos con agujeros roscados en los cuales se colocan masas para simular tres tipos de desbalanceo (dinámico, estático y combinado). Este simulador se acopla al motor eléctrico a través de un acople flexible tipo araña y se fija a la placa perfilada mediante pernos (ver Figura 63).

4.3.4 *Simulador de defectos en rodamientos.* Este simulador cuenta con una chumacera, un eje, una placa guía y cinco porta rodamientos con diferente modos de falla los cuales serán intercambiables, el conjunto placa guía-porta rodamientos prestará la facilidad de montar o desmontar los cinco rodamientos de manera fácil y efectiva (ver Figura 64).

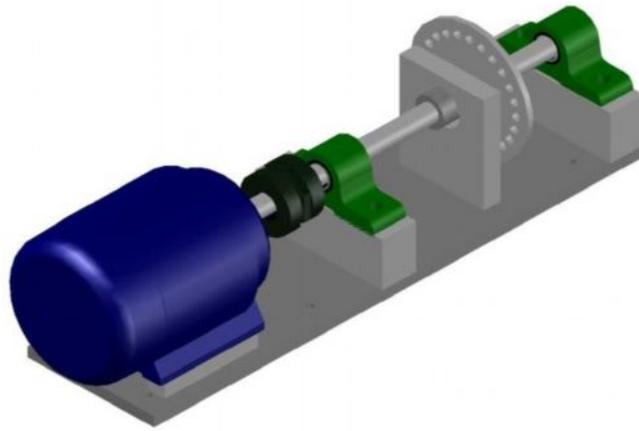
4.3.5 *Simulador de eje fisurado.* Este simulador cuenta con dos chumaceras y dos ejes de diferente longitudes con bridas soldadas aun extremo, los cuales tienen agujeros pasantes y agujeros roscados para fijarlos uno respecto al otro con los que se podrá simular el comportamiento vibracional de un eje con fisura (ver Figura 65).

Figura 61. Diseño de la base del motor y simulador de desalineación



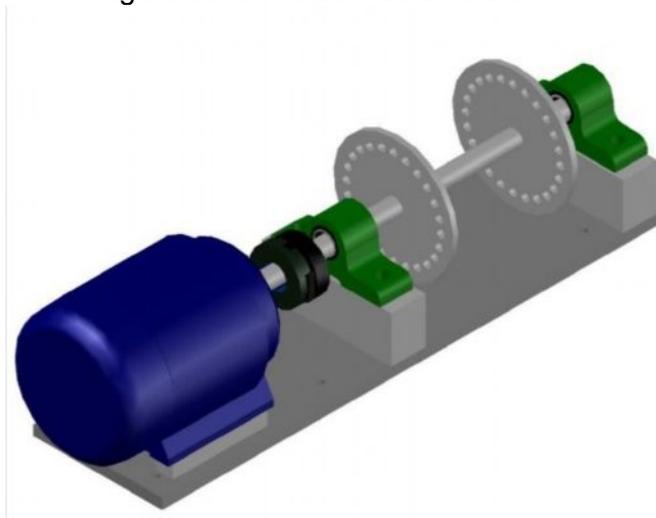
Fuente: Autores

Figura 62. Simulador de árbol elástico



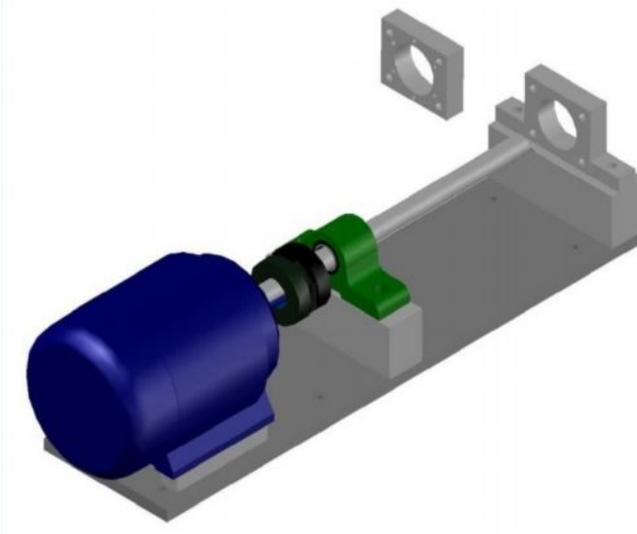
Fuente: Autores

Figura 63. Simulador de desbalanceo



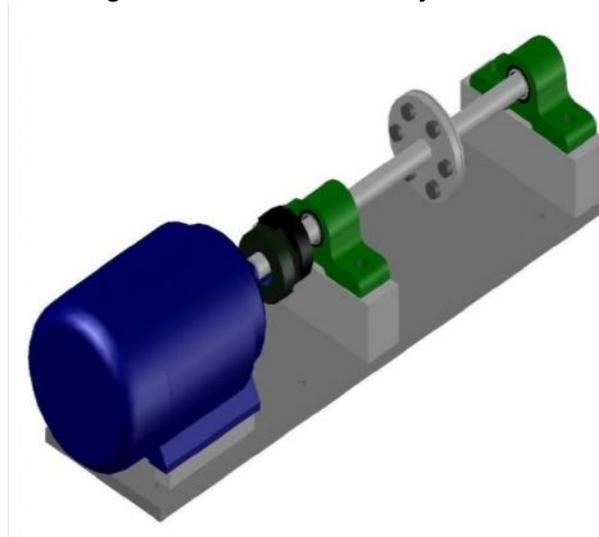
Fuente: Autores

Figura 64. Simulador de defectos en rodamientos



Fuente: Autores

Figura 65. Simulador de eje fisurado



Fuente: Autores

4.4 Diseño eléctrico del modular

El circuito eléctrico consta de los siguientes elementos:

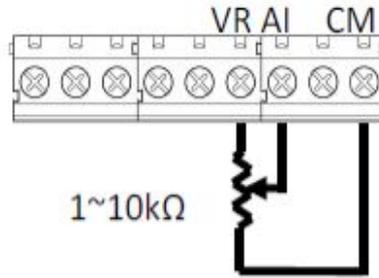
Tabla 9. Componentes eléctricos y electrónicos

Elemento	Función	Imagen
Disyuntor trifásico	Cumple la función de proteger a los elementos eléctricos de un circuito. Actúa como interruptor automático y ante un cortocircuito o incremento en la intensidad de corriente es capaz de interrumpir el flujo de energía.	
Contactador trifásico	Cuando la bobina del contactor recibe corriente eléctrica actúa como un electroimán, cerrando los contactos principales y permitiendo el paso de la energía eléctrica a través de los contactos principales y/o auxiliares.	
Variador de Frecuencia	Este dispositivo electrónico permite controlar la frecuencia de giro del motor eléctrico. Se utilizara un variador LS modelo iE5, mismo que es necesario programar y conectar a un potenciómetro externo para tener más accesibilidad de uso.	
Motor de inducción trifásico	El motor eléctrico generará la fuerza motriz para la adquisición de señales de vibración en cada práctica. Se utilizara un motor eléctrico trifásico de ½ HP.	
Interruptor de paro	Es un elemento muy importante en todo sistema para poder detener una máquina o equipo en caso de presentarse una emergencia.	
Selector y luces piloto	Su función es abrir o cerrar el circuito según se requiera. Indican cuando el sistema está energizado o en funcionamiento.	

Fuente. Autores

4.4.1 Conexión y programación del variador de frecuencia. Mediante el variador de frecuencia se podrá controlar la velocidad de giro del motor eléctrico. Se conectará el variador de frecuencia a un potenciómetro como lo muestra la Figura 66.

Figura 66. Conexión variador y potenciómetro



Fuente: Manual de usuario variador Ei5

Dónde:

VR: Alimentación para externo

AI: Bornero analógico

CM: Común de señal de entrada

Se configura el uso del potenciómetro por el bornero AI de la siguiente manera:

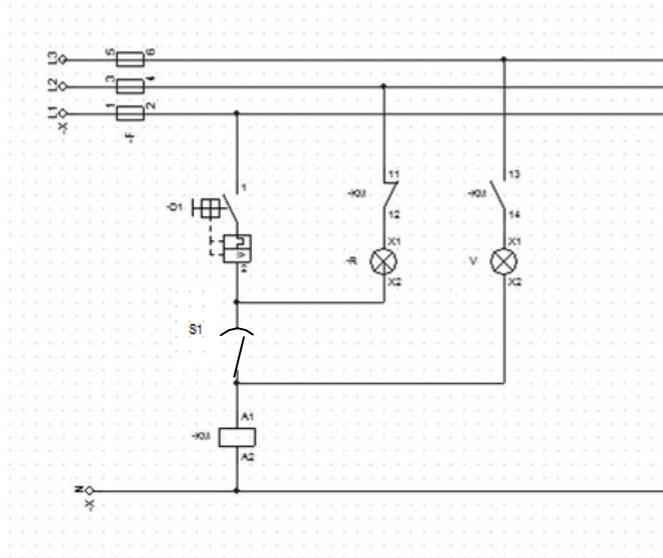
Tabla 10. Programación del variador de frecuencia

No.	Indicación	Descripción
1		Encender el Variador
2		Desplazarse a Frq y presionar FUNC.
3		Presionar SHFT, cambiar a programación 2 y presionar FUNC
4		Regresar al grupo de funciones anteriores
5		Desplazarse hasta el primer código de grupo de función y programar el valor de la frecuencia en 60 Hz y presionar RUN. Se puede variar este valor según nuestras necesidades

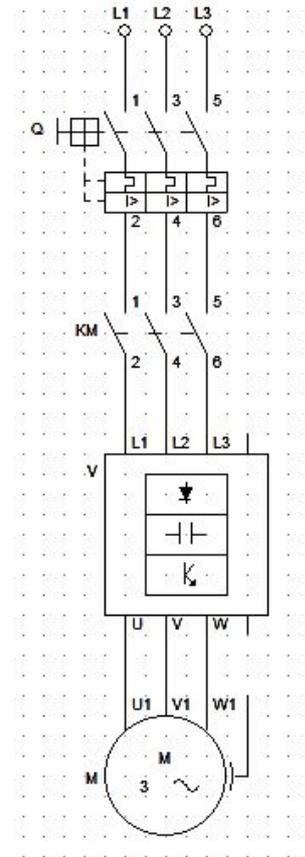
Fuente: Autores

4.4.2 Circuito eléctrico de control y de potencia. En la Figura 67, se detalla el diseño de los circuitos de control y potencia, graficando sus componentes de protección como fusibles y relés térmicos bimetálicos, pulsadores de emergencia, selectores, bobina del contactor y sus contactos NO, NC y contactos de potencia, variador de frecuencia y el motor de inducción jaula de ardilla trifásico.

Figura 67. Circuito eléctrico



a) Control



b) Potencia

Fuente: Autores

CAPÍTULO V

5. PRUEBAS Y RESULTADOS

La aplicación ha sido diseñada con el fin de ser un complemento para el laboratorio, el cual cuenta con el equipo VIBRAcheck 200 y el software MAINTraQ Viewer para el análisis de vibraciones.

5.1 Comparación de la aplicación VISUALspectrum con VIBRAcheck 200

Se realizó una comparación de la aplicación propuesta con la existente en el módulo de desbalanceo LP-S1-B, los acelerómetros fueron colocados en el lado libre del motor, en sentido radial posición vertical (ver Figura 68).

Figura 68. Módulo de desbalanceo LP-S1-B



Fuente: Autores

El motor transmite movimiento a un volante de desbalanceo mediante un sistema de poleas con una relación de 2:1, y gira a 3600 rpm por lo que la velocidad de la polea conducida será de 1800 rpm, en el análisis espectral se espera encontrar los espectros de la polea conductora, la polea conducida, la banda de transmisión.

Se comparó las formas de ondas y los espectros en las magnitudes de desplazamiento, velocidad y aceleración, dicha comparación ha sido realizada con los valores de vibración más aproximados, con esto se ha conseguido que las formas de onda que entregan Viewer y VISUALspectrum sean los más semejantes, de la misma manera se ha realizado con los espectros tomando como referencia los entregados por Viewer esperando encontrar los mismos armónicos en VISUALspectrum a las mismas frecuencias con sus respectivas amplitudes, estos valores se visualizan en una tabla para cada magnitud analizada.

Figura 69. Módulo de desbalanceo LP-S1-B

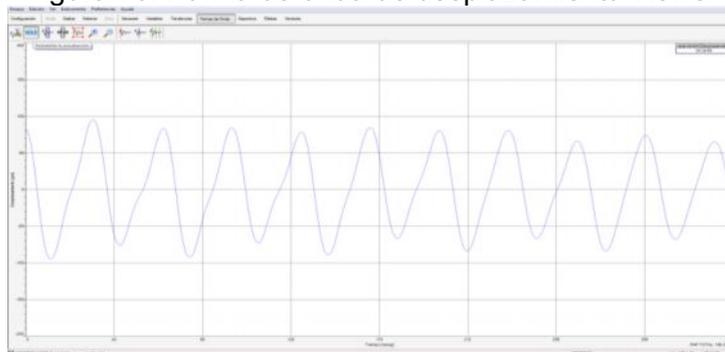


Fuente: Autores

También se ha desarrollado un análisis estadístico, para lo cual se han tomado muestras con un tamaño $n=100$, estas son mediciones de vibración consecutivas de ambos programas para cada magnitud mencionada anteriormente. De estas muestras se calculó la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación, el objetivo de realizar estos cálculos es efectuar una comparación para saber cuánta precisión tiene VISUALspectrum en comparación con el conjunto VIBRAcheck 200- MAINtraq Viewer. Calculando la media se obtienen los promedios de las muestras y con la desviación estándar la dispersión de las mediciones, para acotar mayor información a la estadística realizada se ha realizado una representación gráfica mediante histogramas y así analizar el comportamiento de las mediciones. Los cálculos del coeficiente de variación compara la variabilidad de las mediciones que entrega los conjuntos VIBRAcheck 200-MAINTraq Viewer y NI 9234-VISUALspectrum.

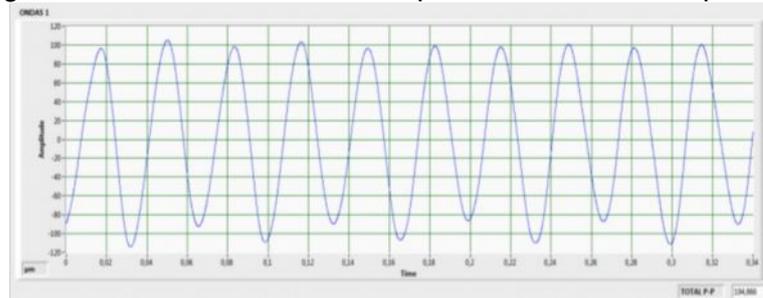
5.1.1 Comparación formas de onda. Las Figuras 70, 71, 72, 73, 74 y 75, representan las formas de onda obtenidas por los dos programas, acompañadas por las Tablas 12, 13 y 14, que expresan sus valores de vibración. Visualmente se ha determinado que las formas de onda tienen una gran similitud así como sus valores de vibración.

Figura 70. Forma de onda de desplazamiento Viewer



Fuente: Autores

Figura 71. Forma de onda de desplazamiento VISUALspectrum



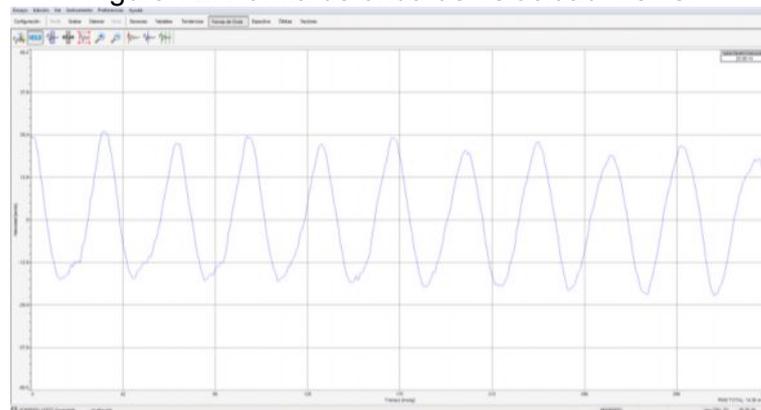
Fuente: Autores

Tabla 11. Vibración total p-p desplazamiento

Forma de Onda Desplazamiento	
VIBRAcheck	190,3 μm
VISUALspectrum	194,8 μm

Fuente: Autores

Figura 72. Forma de onda de velocidad Viewer



Fuente: Autores

Figura 73. Forma de onda de velocidad VISUALspectrum



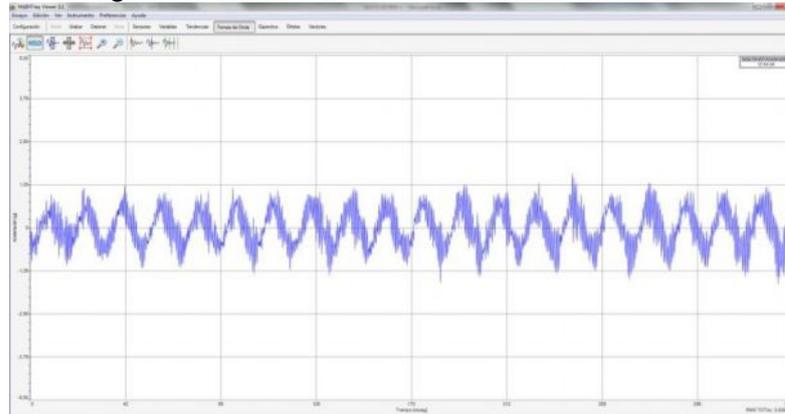
Fuente: Autores

Tabla 12. Vibración total rms velocidad

Forma de Onda Velocidad	
VIBRAcheck	14,38 mm/s
VISUALspectrum	15,28 mm/s

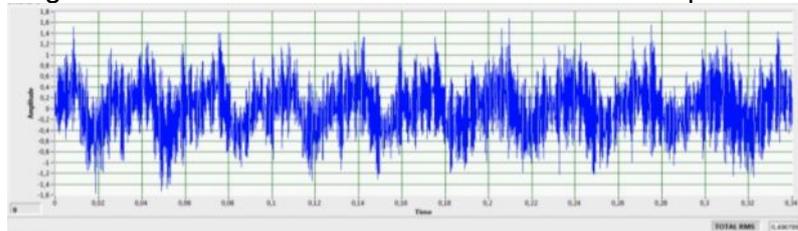
Fuente: Autores

Figura 74. Forma de onda de aceleración Viewer



Fuente: Autores

Figura 75. Forma de onda de aceleración VISUALspectrum



Fuente: Autores

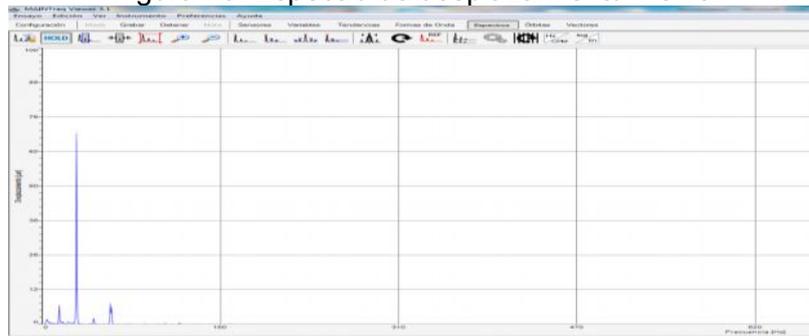
Tabla 13. Vibración total RMS desplazamiento

Forma de Onda Aceleración	
VIBRAcheck	0,535 g
VISUALspectrum	0,4967 g

Fuente: Autores

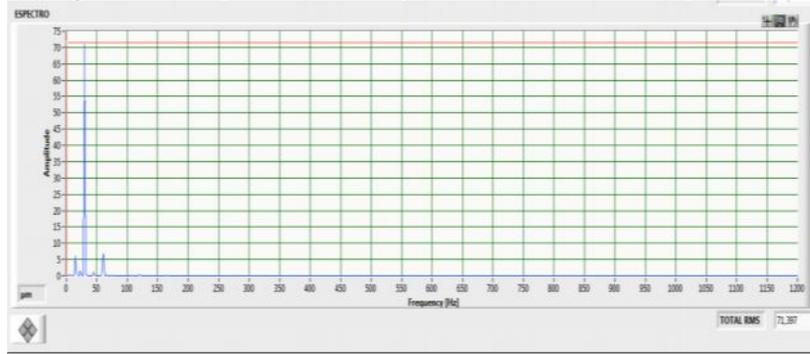
5.1.2 Comparación espectros. Las Figuras 76, 77, 78, 79, 80 y 81 corresponden a los espectros y están acompañadas por las Tablas 14, 15, 16, que expresan los armónicos con sus respectivas frecuencias y amplitudes. Se ha determinado que los armónicos encontrados están a las mismas frecuencias y amplitudes muy aproximadas.

Figura 76. Espectro de desplazamiento Viewer



Fuente: Autores

Figura 77. Espectro de desplazamiento VISUALspectrum



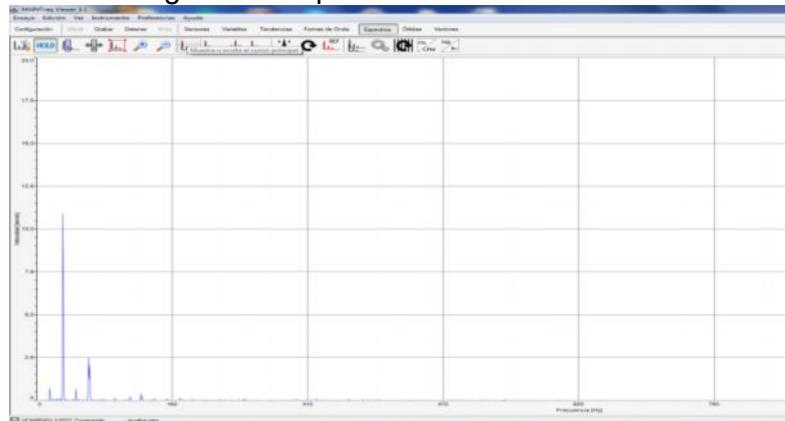
Fuente: Autores

Tabla 14. Amplitudes de los espectros en desplazamiento

Espectro Desplazamiento			
VIBRAcheck		VISUALspectrum	
Vibración global	70,62 (µm)	Vibración global	71,397 (µm)
Frecuencia (Hz)	Amplitud (µm)	Frecuencia (Hz)	Amplitud (µm)
15	6,4	15	5,97
30	69,4	30	71,09
60	7,5	60	7,69

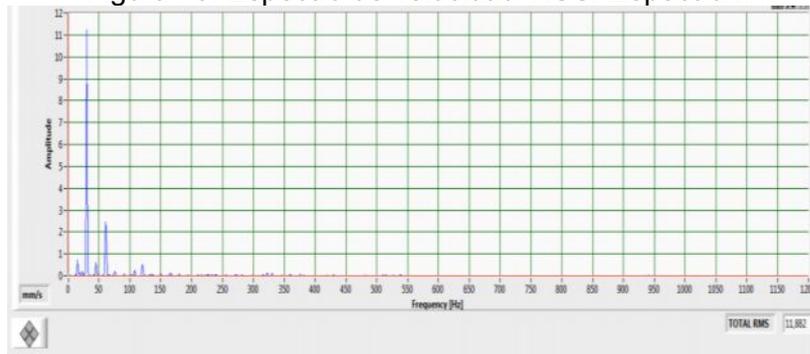
Fuente: Autores

Figura 78. Espectro de velocidad Viewer



Fuente: Autores

Figura 79. Espectro de velocidad VISUALspectrum



Fuente: Autores

Tabla 15. Amplitudes de los espectros en velocidad

Espectro Velocidad			
VIBRAcheck		VISUALspectrum	
Vibración global	11,66 mm/s	Vibración global	11,88 mm/s
Frecuencia (Hz)	Amplitud mm/s	Frecuencia (Hz)	Amplitud mm/s
15	0,69	15	0,71
30	10,90	30	11,28
45	0,66	45	0,28
60	2,50	60	2,74
120	0,38	120	0,56

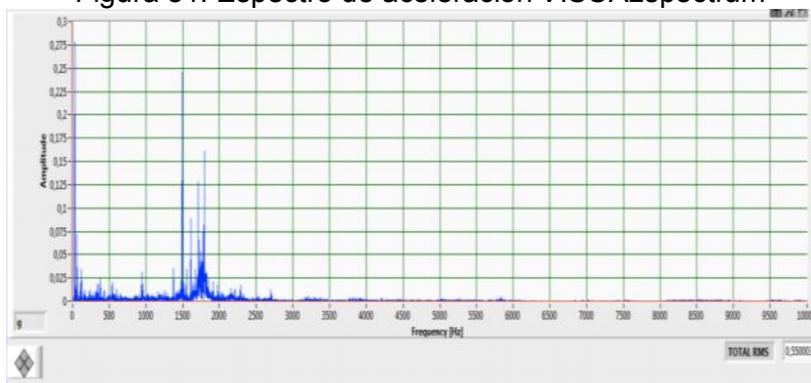
Fuente: Autores

Figura 80. Espectro de aceleración Viewer



Fuente: Autores

Figura 81. Espectro de aceleración VISUALspectrum



Fuente: Autores

Tabla 16. Amplitudes de los espectros en aceleración

Espectro Aceleración			
VIBRAcheck		VISUALspectrum	
Vibración global	0,68 g	Vibración global	0,55 g
Frecuencia (Hz)	Amplitud (g)	Frecuencia (Hz)	Amplitud (g)
30	0,2181	30	0,279
60	0,1830	60	0,083
1491	0,3172	1491	0,251
1611	0,1958	1611	0,093
1705	0,1009	1705	0,134
1778	0,1054	1778	0,079

Fuente: Autores

5.2 Análisis estadístico

Se han tomado muestras $n=100$, de mediciones continuas de las magnitudes de desplazamiento, velocidad y aceleración para ambos programas. Las muestras han sido tomadas del equipo en operación durante x tiempo, con el sensor de cada colector colocado en el mismo punto. Ver en el Anexo D las muestras y las tablas estadísticas.

5.2.1 La media \bar{x} La media entrega el promedio de las muestras tomadas, esta medida de tendencia central permite compensar todos los valores obtenidos y representarlos en uno solo (MURRAY & LARRY, 2009). Para este estudio se ha calculado la media aritmética de cada muestra con el fin de comprender el comportamiento de los datos y compararlos.

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i * f_i}{n} \quad (6)$$

En la Tabla 17 se observan los valores de las medias obtenidas de MAINTraQ Viewer y VISUALspectrum, en las magnitudes de desplazamiento, velocidad y aceleración la diferencia de sus medias no son considerables. La media no nos brinda mucha información pero es un dato necesario para un cálculo posterior.

Tabla 17. Medias aritméticas

Media \bar{x}		
Magnitudes	MAINTraQ Viewer	VISUALspectrum
Desplazamiento	130,35 μm	137,02 μm
Velocidad	12,22 mm/s	11,14 mm/s
Aceleración	0,49 g	0,47 g

Fuente: Autores

5.2.2 Desviación estándar σ . El grado de variación de datos numéricos respecto a un valor dado se conoce como dispersión. Para analizar el comportamiento de las muestras no es suficiente calcular solo valores de tendencia central, sino que también es necesario obtener las desviaciones estándar, que permiten medir cuán concentrados o dispersos están los datos en todo su rango de valores entorno a las medias \bar{x} calculadas anteriormente (MURRAY & LARRY, 2009).

En la Tabla 18 se observa las desviaciones estándar de ambos programas cuyos valores los podemos compaginar con los histogramas respectivos.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (7)$$

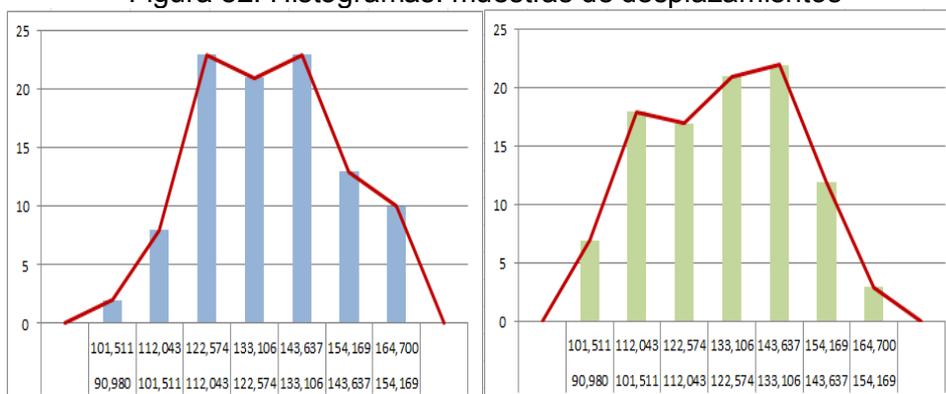
Tabla 18. Desviaciones estándar

Desviación estándarS		
Magnitudes	MAINTraq Viewer	VISUALspectrum
Desplazamiento	15,786 μm	9,378 μm
Velocidad	1,681 mm/s	0,566 mm/s
Aceleración	0,059 g	0,018 g

Fuente: Autores

Para desplazamiento el valor de desviación estándar de MAINTraq Viewer es mayor que el de VISUALspectrum por 6,408 μm, esto se observa en la Figura 82 literal a) los datos de desplazamiento de MAINTraq Viewer se encuentran concentrados en tres categorías pero con mayor frecuencia por lo que desviación estándar es de 15,786 μm mientras que en el literal b) los datos de VISUALspectrum están concentrados en cuatro categorías con menor frecuencia lo que arroja una desviación estándar de 9,378 μm.

Figura 82. Histogramas: muestras de desplazamientos



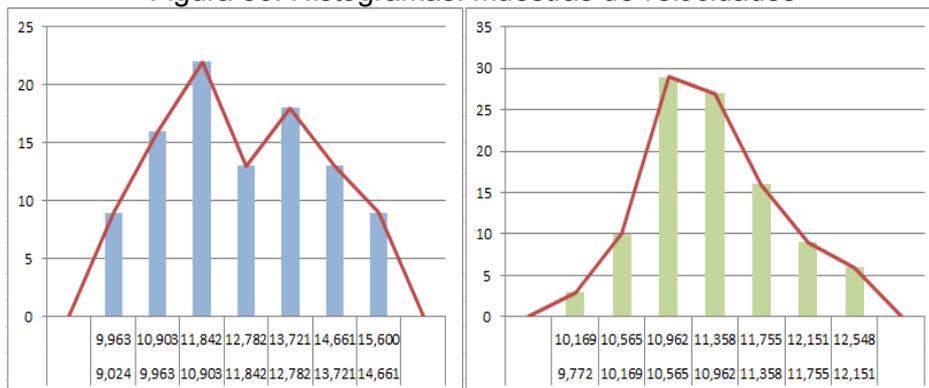
a) Histograma de la muestra de desplazamiento Viewer

b) Histograma de la muestra de desplazamiento VISUALspectrum

Fuente: Autores

En la magnitud velocidad la diferencia de la desviación estándar es de 1,115 mm/s, siendo MAINTraq Viewer el que mayor dispersión tiene, analizando la Figura 83 literal a) se confirma que los datos de MAINTraq Viewer están concentrados en varias categorías obteniendo una desviación estándar de 1,681 mm/s, mientras que en el literal b) la distribución de los datos VISUALspectrum están concentrados en dos categorías situados en la mitad del histograma es decir entorno a su media \bar{x} obteniendo una desviación estándar de 0,566 mm/s que es menos de la mitad de la desviación estándar obtenida en el software MAINTraq Viewer.

Figura 83. Histogramas: muestras de velocidades



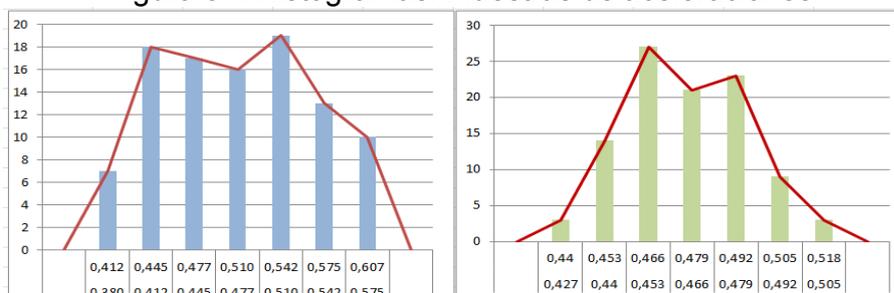
a) Histograma de la muestra de velocidad Viewer

b) Histograma de la muestra de velocidad VISUALspectrum

Fuente: Autores

En la magnitud aceleración la diferencia de la desviación estándar es de 0,041 g siendo MAINTraq Viewer el que mayor dispersión de sus datos tiene, en la Figura 84 literal a) se observa que la dispersión de los datos en MAINTraq Viewer está en varias categorías con frecuencias muy cercanas por lo que su desviación estándar es de 0,059 g mientras que en el literal b) los datos de VISUALspectrum tienen una concentración en las categorías del centro con unas frecuencias mucho mayores que las de MAINTraq Viewer, por eso su desviación estándar es de 0,018 g.

Figura 84. Histogramas: muestras de aceleraciones



a) Histograma de la muestra de aceleración Viewer

b) Histograma de la muestra de aceleración VISUALspectrum

Fuente: Autores

Este análisis de la desviación estándar demuestra que la aplicación desarrollada tiene sus datos más concentrados entorno a su media \bar{X} Pero estos valores de desviación estándar solo indica el promedio de la desviación entorno a la media \bar{X} de cada muestra, este es un buen indicador para saber cuan dispersos son las mediciones de ambos conjuntos, pero no indica cuanta variabilidad tienen estos.

Para tener una mejor percepción de cuan aceptable es VISUALspectrum se ha calculado el coeficiente de variación.

5.2.3 Coeficiente de variación. Se ha empleado el cálculo del coeficiente de dispersión relativa para analizar la variabilidad que existe entre dos muestras. Este coeficiente no toma en cuenta el tipo unidad, ni el tamaño n con el que trabaja las muestras obtenidas y expresa su valor en porcentaje. Para cada muestra se ha calculado su media \bar{x} y desviación estándar σ con el fin de determinar la concentración de los datos que existe en cada de ellas (MURRAY & LARRY, 2009).

$$\sigma V = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100 \quad (8)$$

Tabla 19. Coeficientes de variación

Coeficiente de variación		
Magnitudes	MAINTraq Viewer	VISUALspectrum
Desplazamiento	12,05%	6,84%
Velocidad	13,69%	5,06%
Aceleración	12,07%	3,85%

Fuente: Autores

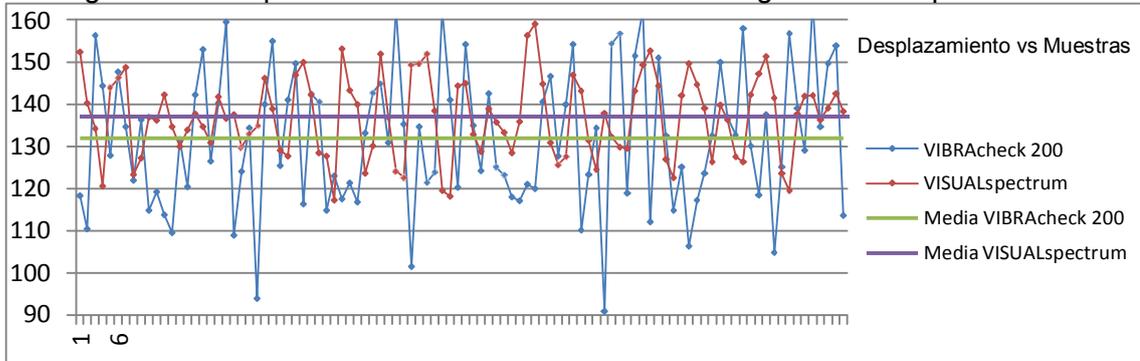
Para la magnitud de desplazamiento en la Tabla 19 se observa que MAINTraq Viewer tiene una variabilidad del 12,05% y que la variabilidad de VISUALspectrum es 6,84%. En la Figura 85 se indica el comportamiento de ambas muestras, manteniéndose los datos de VISUALspectrum más concentrados entorno a su media \bar{X} mientras que los datos de MAINTraq Viewer son más dispersos.

La magnitud de desplazamiento para el análisis de vibraciones llevado a cabo en el laboratorio es relevante, por lo que alguna diferencia considerable en la misma se pasará por alto, enfocándonos en las magnitudes de velocidad y aceleración. Éste criterio se sustenta en que el sensor usado para el análisis es un acelerómetro y que el motor usado para las prácticas gira a más de 10 Hz.

Para la magnitud de velocidad se observa en la Tabla 19 que la variabilidad de VISUALspectrum es de 5,06% mientras que la variabilidad de MAINTraq Viewer es del 13,69%, esto indica que VISUALspectrum es más constante en sus datos, esto es confirmado en la Figura 86 donde se observa que los datos de VISUALspectrum están concentrados entorno a su media \bar{X} mientras que los datos de MAINTraq están muy dispersos. Este análisis valida a la aplicación en la magnitud de velocidad, resaltando que en esta magnitud se visualiza la mayoría de los modos de fallos. Para la magnitud de aceleración se observa en la Tabla 19 que el porcentaje de variabilidad de VISUALspectrum es de 3,05% mucho menor que el programa de referencia MAINTraq

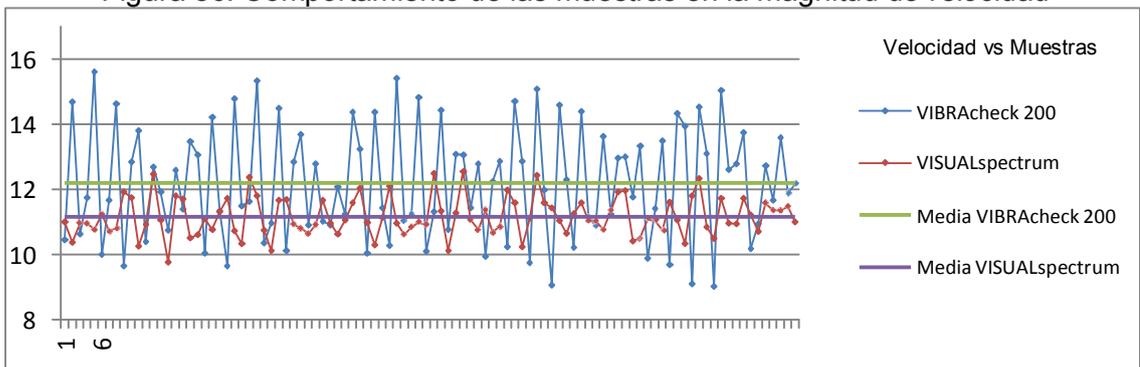
que tiene variabilidad del 12,07%, la variabilidad en esta magnitud es muy importante ya que la información recibida aquí es integrada para obtener las otras magnitudes de vibración.

Figura 85. Comportamiento de las muestras en la magnitud de desplazamiento



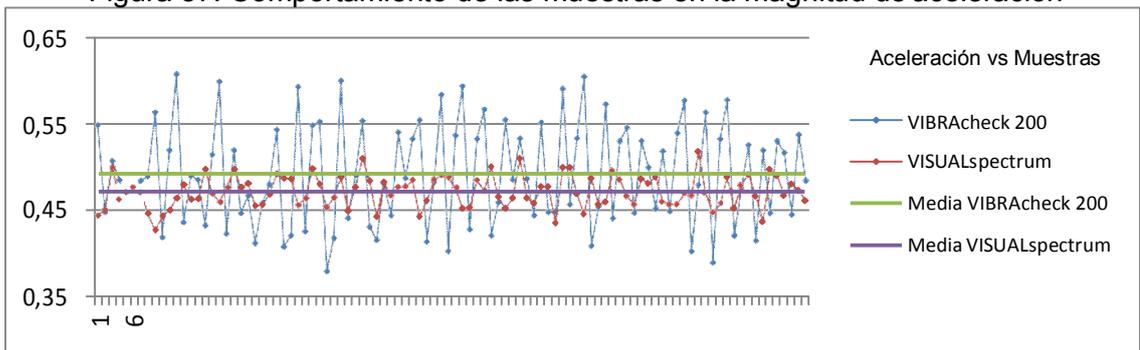
Fuente: Autores

Figura 86. Comportamiento de las muestras en la magnitud de velocidad



Fuente: Autores

Figura 87. Comportamiento de las muestras en la magnitud de aceleración



Fuente: Autores

En las Figuras 85, 86 y 87, se observó que los valores de VIBRAcheck 200 son muy dispersos mientras que los de VISUALspectrum son más concentrados tratándose de muestras tomadas en el mismo equipo y con instrumentos de características muy similares ver Anexo E.

CAPÍTULO VI

6. GUÍA DE OPERACIONES Y GUÍAS PRÁCTICAS

La aplicación VISUALspectrum cuenta con una guía de operación y también con guías prácticas para poder desarrollar los laboratorios.

6.1 Guía de operación

VISUALspectrum es un programa diseñado para visualizar las formas de onda y espectros en una misma ventana, permite navegar entre pestañas para seleccionar el parámetro que se desea analizar como desplazamiento, velocidad, aceleración y envolvente. Existen tres pestañas principales destinadas para cada acelerómetro conectado al módulo de adquisición de datos NI 9234, los cuales cuentan con las mismas características (ver Anexo F).

- **Preparación de Hardware:** Esta parte del contenido indica como conectar el Módulo de adquisición de datos (DAQ), a la computadora y también como conectar los acelerómetros a la DAQ.
- **Configuración:** Muestra las diferentes opciones que podemos seleccionar en: Variables, Ventanas y Configuración de Espectros, al momento de realizar las mediciones.
- **Mediciones:** Indica las herramientas para el análisis en tiempo real, las mismas que ayudarán al análisis de las mediciones obtenidas.

6.2 Guías prácticas

El desarrollo de las guías de laboratorio ayudará al estudiante a comprender los efectos vibracionales en cada modo de fallo analizado (ver Anexo G).

6.3 Plan de mantenimiento

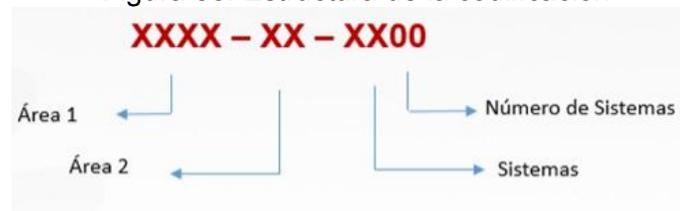
Con el fin de contribuir con el mantenimiento que se realiza en los laboratorios de la Facultad de Mecánica, específicamente el llevado a cabo en el Laboratorio de Análisis

Vibracional y Alineación Láser, se realizará la documentación necesaria que permitirán gestionar el mantenimiento del modular mediante el asistente informático SISMAC. Entre lo cual se codificará al modular y sus simuladores siguiendo la estructura por niveles usado por SISMAC, no se realizará ningún Lay-Out de la ubicación del activo ya que actualmente en el laboratorio no existe espacio suficiente para el modular.

Se implementará un banco de tareas con actividades de mantenimiento realizables y sencillas, así como también se diseñará un programa de mantenimiento para el modular y los simuladores estableciendo frecuencias.

6.3.1 Codificación. Para ayudar con la gestión del mantenimiento que se lleva en la Facultad de Mecánica, el modular y los simuladores de modos de fallos propuestos en la presente tesis, serán codificados mediante una estructura arbórea conformada por una combinación de letras y números, ésta estructura tendrá una configuración por niveles (ver Figura 89) con los cuales se podrá identificar en su totalidad al activo. Este es el tipo de codificación con el que trabaja el software SISMAC (MEJIA , 2014).

Figura 88. Estructura de la codificación



Fuente. Mejía Diego, 2014

Dónde:

- Área 1: Es el primer nivel y se refiere a la Facultad al que pertenece al activo, para el caso de la Facultad de Mecánica se usará la denominación FAME.
- Área 2: Es el segundo nivel y se refiere a los laboratorios que conforman la Facultad de Mecánica, para el Laboratorio Vibracional y Alineación Láser se usará la denominación LV.
- Sistemas: Se refiere a las máquinas, equipos o instrumentos operativos empleados en las prácticas del laboratorio.
- Número de sistemas: Se refiere a la cantidad de sistemas del mismo tipo.

Tabla 20. Denominación de sistemas

Activo	Denominación
Modular	OR
Simulador de desalineación	KD
Simulador de desbalanceo	KO
Simulador de eje fisurado	KE
Simulador de árbol elástico	KA
Simulador de fallo de rodamientos	KR
Motor para prácticas (kits)	MK

Fuente. Autores

Habiendo definido los niveles de la codificación, se ha determinado en la Tabla 21 los códigos que se usarán para identificar al modular y los simuladores de modos de falla.

Tabla 21. Codificación del modular y los simuladores de modos de fallo

Activo	Código
Modular	FAME-LV-OR01
Simulador de desalineación	FAME-LV-KD01
Simulador de desbalanceo	FAME-LV-KO01
Simulador de eje fisurado	FAME-LV-KE01
Simulador de árbol elástico	FAME-LV-KA01
Simulador de fallo de rodamientos	FAME-LV-KR01
Motor para prácticas (kits)	FAME-LV-MK01

Fuente. Autores

6.3.2 Banco de tareas. Las actividades de mantenimiento para el modular y los simuladores serán tareas de mantenimiento autónomo, preventivas rutinarias y condicionadas por diagnóstico las cuales serán realizadas por el asistente del laboratorio y los estudiantes.

Tabla 22. Banco de tareas

No	Tareas	Frecuencia
01	Lubricación de chumaceras	Antes de usar
02	Limpieza de simuladores	Antes y después de usar
03	Limpieza del motor	Antes y después de usar
04	Limpieza de la placa ranurada FESTO	Antes y después de usar
05	Inspección del acople	Semestral
06	Verificar estado de chumaceras mediante análisis vibracional	Semestral
07	Verificar estado de rodamientos del motor mediante análisis vibraciones	Semestral
08	Ajuste de pernos de anclaje del motor	Semestral
09	Ajuste de borneras del motor	Semestral
10	Ajuste de borneras del circuito de control y potencia	Semestral
11	Verificación de la programación del variador de frecuencia	Semestral
12	Verificación del estado de las repisas	Semestral
13	Ajuste de pernos de sujeción del espaldar del módulo	Semestral
14	Verificar el estado de las planchas de caucho	Semestral

Fuente: Autores

6.3.3 Programa de mantenimiento. De forma sencilla se describe las actividades del banco de tareas para cada activo con su respectiva frecuencia.

Tabla 23. Programa de mantenimiento

Elemento	Actividades	Frecuencia
Desalineación	Lubricación de chumaceras	Antes de usar
	Limpieza del simulador	Antes y después de usar
	Inspección del acople	Semestral
	Verificación del estado de las chumaceras mediante análisis de vibraciones	Semestral
Árbol elástico	Lubricación de chumaceras	Antes de usar
	Limpieza del simulador	Antes y después de usar
	Inspección del acople	Semestral
	Verificación del estado de las chumaceras mediante análisis de vibraciones	Semestral
Eje fisurado	Lubricación de chumaceras	Antes de usar
	Limpieza del simulador	Antes y después de usar
	Inspección del acople	Semestral
	Verificación del estado de las chumaceras mediante análisis de vibraciones	Semestral
Desbalanceado	Lubricación de chumaceras	Antes de usar
	Limpieza del simulador	Antes y después de usar
	Inspección del acople	Semestral
	Verificación del estado de las chumaceras mediante análisis de vibraciones	Semestral
Motor	Limpieza del motor	Antes y después de usar
	Verificación del estado de rodamientos mediante análisis de vibraciones	Semestral
	Inspección del acople	Semestral
	Ajuste de pernos de anclaje	Semestral
	Ajuste de borneras.	Semestral
Tablero de control	Ajuste de borneras del circuito de control y potencia.	Semestral
	Verificación de la programación del variador de frecuencia IE-5	Semestral
	Ajuste de las borneras de las tomas de corriente trifásica y monofásica	Semestral
Estructura del modular	Limpieza de la mesa ranurada FESTO	Antes y después de usar
	Verificación del estado de las repisas	Semestral
	Ajuste de pernos de sujeción del espaldar del módulo y tablero de herramientas	Semestral
	Verificar del estado de las planchas de impacto de la mesa	Semestral

Fuente: Autores

6.3.4 Fichas de las actividades de mantenimiento. En estas fichas se han colocado el número de tarea, las frecuencias, el tiempo de ejecución, el estado operativo de la máquina, los procedimientos de las actividades del banco de tareas, como también las herramientas, materiales y equipos empleados en estas. También se detalla ciertas observaciones que se deberá considerar al realizar la actividad de mantenimiento (ver Anexo H).

CAPÍTULO VII

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

- La aplicación informática desarrollada en LabVIEW llamada VISUALspectrum, es capaz de representar la vibración medida en formas de onda y espectros en las magnitudes de desplazamiento, velocidad, aceleración y envolvente. Éstas magnitudes fueron evaluadas mediante una comparación visual y estadística con las arrojadas del instrumento VIBRAcheck 200, obteniendo como resultado una menor incertidumbre en los datos obtenidos, lo cual valida a la aplicación desarrollada como una herramienta de diagnóstico eficiente.
- Los módulos de simulación de fallas deben construirse con una alta precisión, debido a que durante la ejecución de los experimentos y las prácticas, pueden interferir los errores de su construcción emitiendo señales de falla indeseadas.
- Los instrumentos empleados para la adquisición de la vibración Chasis DAQ NI 9171, módulo NI 9234 y acelerómetros PCB modelo 603C01 son de muy alta calidad, confiabilidad, y resistentes a impactos. Los cuales obtuvieron resultados muy favorables en comparación con el instrumento VIBRAcheck 200.
- Para aprovechar al máximo las características de la aplicación VISUALspectrum y del modular se diseñaron guías prácticas de laboratorio donde el estudiante comprenderá los efectos de cada modo de falla analizada y una guía de operación de la aplicación. El diseño de una manual de mantenimiento ayudará a preservar las funciones del modular.

7.2 Recomendaciones

- Analizar las características de los instrumentos de medición antes de realizar una comparación entre los mismos
- Para la construcción de módulos de un laboratorio se debe usar instrumentos que comprueben si el módulo cumple con la función requerida.

- Realizar las investigaciones adecuadas para adicionar otras técnicas de análisis vibracional tales como: análisis de órbitas, análisis de orden, etc.
- Ubicar los sensores en el mismo orden con el que están conectados a la tarjeta de adquisición de datos, es decir, sensor uno en el sentido axial, sensor dos en el sentido radial vertical y sensor tres en el sentido radial horizontal.
- Leer completamente el manual de utilización del sistema antes de utilizarlo.
- Efectuar las investigaciones correspondientes sobre la programación para pruebas de balanceo y calidad energética en equipos industriales y añadir al sistema, debido a que la tarjeta de adquisición cuenta con cuatro entradas que facilita esta clase de aplicación.

BIBLIOGRAFÍA

- A-MAQ. (2005).** *A-MAQ Análisis de Maquinaria*. Obtenido de A-MAQ Análisis de Maquinaria:[http://www.a-maq.com/tutoriales/Tutorial%20Vibraciones%20para%20Mantenimiento%20Mecanico %20A-MAQ%202005.pdf](http://www.a-maq.com/tutoriales/Tutorial%20Vibraciones%20para%20Mantenimiento%20Mecanico%20A-MAQ%202005.pdf)
- DAZA , G. (2007).** *Apuntes del Curso de Vibraciones Mecánicas*. Chile.
- DOMINGUEZ, A. (2013).** *Vibraciones Mecánicas - Analisis Espectral*. Obtenido de <http://mantenancela.blogspot.com/2013/10/vibraciones-mecanicas-analisis-espectral.html>
- GARCIA, L. (2014).** *Técnicas de Diagnóstico*. España.
- IDEAR. (2011).** *MAINTraQ Analyzer Guía De Mediciones*. Obtenido de MAINTraQ Analyzer Guía De Mediciones:
<http://www.idearnet.com.ar/manuales/MAINTraQAnalyzer-GuiaDeOperacion.pdf>
- ISO 10816-1. (1995).** “*Vibración mecánica - Evaluación de la vibración en una máquina mediante medidas en partes no rotativas*”. Obtenido de <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:10816:-1:ed-1:v1:en>
- ISO 2041. (2009).** *ISO 2041, Mechanical vibration, shock and condition monitoring -- Vocabulary*. Obtenido de http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=35848
- MEJIA , D. (2014).** *Diseño e implementación de un manual de operación y mantenimiento para los laboratorios de electrotecnia, electrónica, maquinas eléctricas y vibraciones, de la Facultad de mecánica*. Riobamba.
- MURRAY & LARRY. (2009).** *ESTADÍSTICA*. México: MC GRAW HILL 4° Edición.
- NATIONAL INSTRUMENTS. (2004).** *LabVIEW Sound and Vibration Toolki*. Obtenido de https://docsamples.files.wordpress.com/2012/02/svt_um.pdf
- NATIONAL INSTRUMENTS. (2011).** *National Instruments, Tutorial Labview*. Obtenido de National Instruments: <http://www.ni.com/getting-started/labview-basics/esa/environment#frontPanel>
- OPPENHEIM, A. (2011).** *Tratamiento de Señales en Tiempo Discreto*. Pearson Educación.
- SINAIS. (2013).** *Sináis, Ingeniería de Mantenimiento*. Obtenido de Sináis, Ingeniería de Mantenimiento: <http://www.sinais.es/curso-vibraciones.html>
- SINGIRESU, R. (2012).** *Vibraciones Mecánicas*. México: Pearson Educación.
- WHITE, G. (2010).** *Introducción al Análisis de Vibraciones*. Woburn, USA: Azima DLI.

ANEXOS

ANEXO A

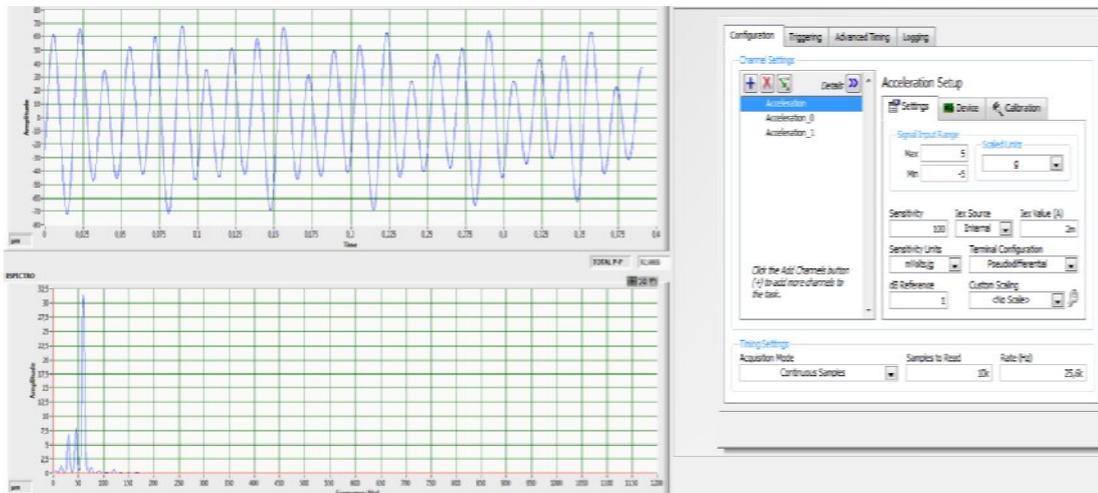
Hoja de características técnicas del acelerómetro PCB modelo 603C01

Model Number 603C01	INDUSTRIAL ICP® ACCELEROMETER		Revision: H ECN # 25657										
Performance	ENGLISH	SI	OPTIONAL VERSIONS										
Sensitivity(± 10 %)	100 mV/g	10.2 mV/(m/s ²)	[2] Optional versions have identical specifications and accessories as listed for the standard model except where noted below. More than one option may be used.										
Measurement Range	± 50 g	± 490 m/s ²											
Frequency Range(± 3 dB)	30 to 600,000 cpm	0.5 to 10,000 Hz	[3]										
Resonant Frequency	1500 kcpm	25 kHz	[1]										
Broadband Resolution(1 to 10,000 Hz)	350 µg	3434 µm/s ²	[1]										
Non-Linearity	± 1 %	± 1 %	[4]										
Transverse Sensitivity	≤ 7 %	≤ 7 %											
Environmental													
Overload Limit(Shock)	5000 g pk	49,050 m/s ² pk											
Temperature Range	-65 to +250 °F	-54 to +121 °C											
Temperature Response	See Graph	See Graph	[1]										
Enclosure Rating	IP68	IP68											
Electrical													
Settling Time(within 1% of bias)	≤ 2.0 sec	≤ 2.0 sec											
Discharge Time Constant	≥ 0.3 sec	≥ 0.3 sec											
Excitation Voltage	18 to 28 VDC	18 to 28 VDC											
Constant Current Excitation	2 to 20 mA	2 to 20 mA											
Output Impedance	<150 ohm	<150 ohm											
Output Bias Voltage	8 to 12 VDC	8 to 12 VDC											
Spectral Noise(10 Hz)	8 µg/√Hz	78.5 (µm/s ²)/√Hz	[1]										
Spectral Noise(100 Hz)	5 µg/√Hz	49.1 (µm/s ²)/√Hz	[1]										
Spectral Noise(1 kHz)	4 µg/√Hz	39.2 (µm/s ²)/√Hz	[1]										
Electrical Isolation(Case)	>10 ⁹ ohm	>10 ⁹ ohm											
Physical													
Size (Hex x Height)	11/16 in x 1.65 in	18 mm x 42.2 mm											
Weight	1.8 oz	51 gm											
Mounting Thread	1/4-28 Female	No Metric Equivalent	[5]										
Mounting Torque	2 to 5 ft-lb	2.7 to 6.8 N-m											
Sensing Element	Ceramic	Ceramic											
Sensing Geometry	Shear	Shear											
Housing Material	Stainless Steel	Stainless Steel											
Sealing	Welded Hermetic	Welded Hermetic											
Electrical Connector	2-Pin MIL-C-5015	2-Pin MIL-C-5015											
Electrical Connection Position	Top	Top											
<p>Typical Sensitivity Deviation vs Temperature</p>													
<p>NOTES:</p> <p>[1] Typical. [2] Conversion Factor 1g = 9.81 m/s². [3] The high frequency tolerance is accurate within ±10% of the specified frequency. [4] Zero-based, least-squares, straight line method. [5] 1/4-28 has no equivalent in S.I. units. [6] See PCB Declaration of Conformance PS023 or PS060 for details.</p>													
<p>SUPPLIED ACCESSORIES:</p> <p>Model 081A40 Mounting Stud Model ICS-2 NIST-traceable single-axis single-point amplitude response calibration at 6000 cpm (100 Hz) (1)</p>													
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Entered: <i>[Signature]</i></td> <td>Engineer: <i>[Signature]</i></td> <td>Sales: <i>[Signature]</i></td> <td>Approved: <i>[Signature]</i></td> <td>Spec Number:</td> </tr> <tr> <td>Date: 1/29/07</td> <td>Date: 1/31/07</td> <td>Date: 1/31/07</td> <td>Date: 1/31/07</td> <td style="text-align: center;">13145</td> </tr> </table>				Entered: <i>[Signature]</i>	Engineer: <i>[Signature]</i>	Sales: <i>[Signature]</i>	Approved: <i>[Signature]</i>	Spec Number:	Date: 1/29/07	Date: 1/31/07	Date: 1/31/07	Date: 1/31/07	13145
Entered: <i>[Signature]</i>	Engineer: <i>[Signature]</i>	Sales: <i>[Signature]</i>	Approved: <i>[Signature]</i>	Spec Number:									
Date: 1/29/07	Date: 1/31/07	Date: 1/31/07	Date: 1/31/07	13145									
<p>IMI SENSORS A PCB PIEZOTRONICS DIV. 3425 Walden Avenue, Depew, NY 14043</p> <p>Phone: 800-959-4464 Fax: 716-684-3823 E-Mail: imi@pcb.com</p>													
<p><i>All specifications are at room temperature unless otherwise specified. in the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice.</i></p> <p>ICP® is a registered trademark of PCB Group, Inc.</p>													

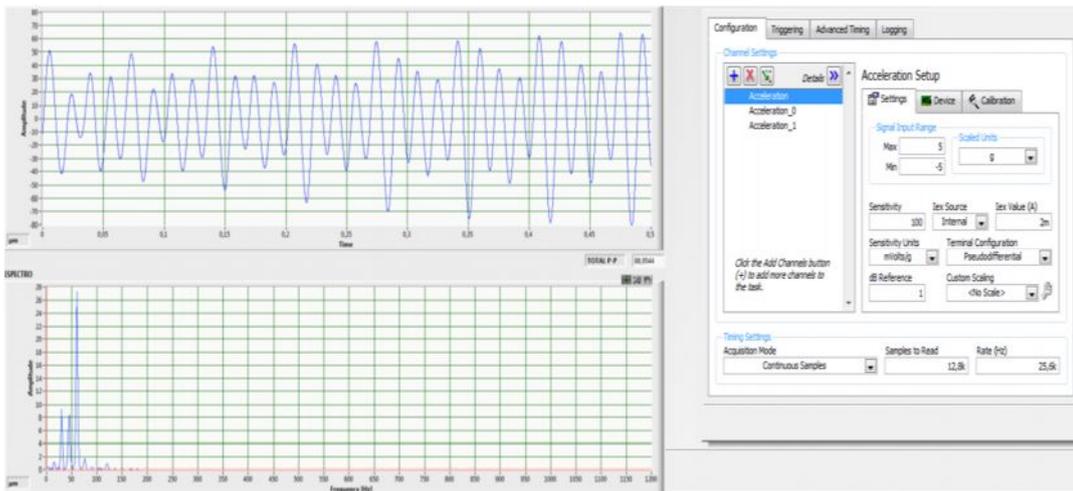
Fuente: Industrial ICP

ANEXO B

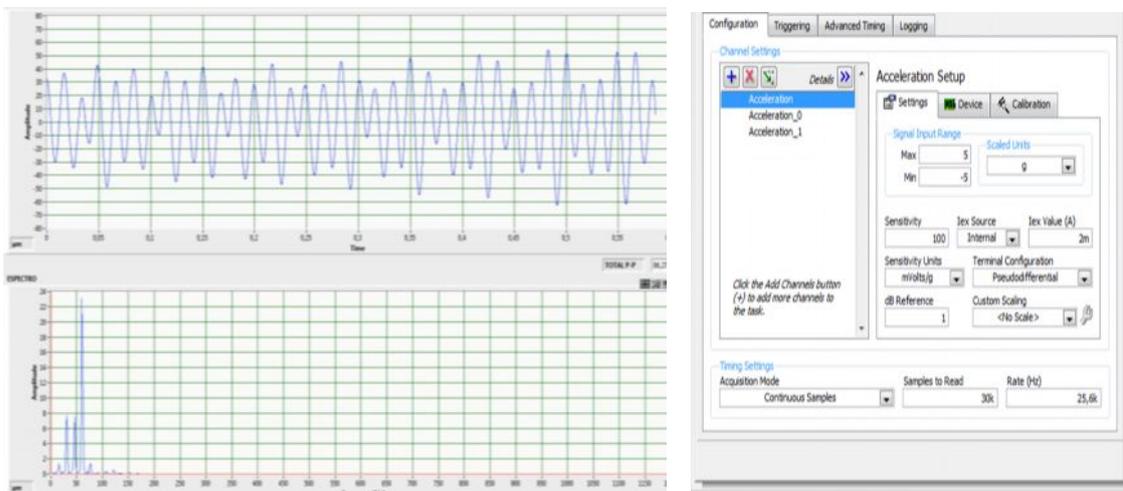
Resolución espectral y periodo de muestreo



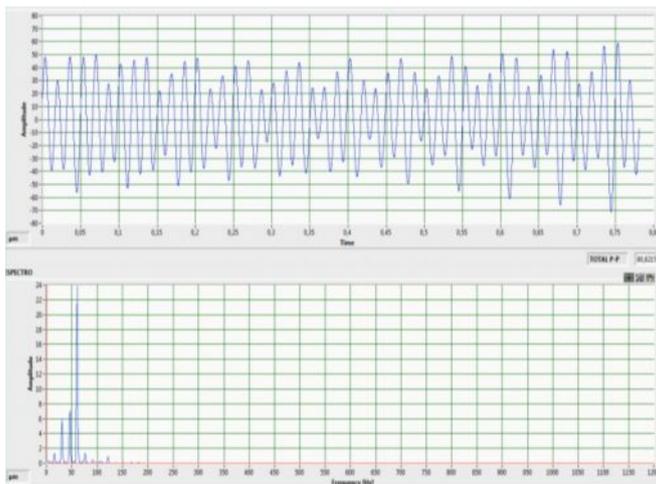
$$T=0,390625 \text{ s}, \Delta f_s=2,56$$



$$T=0,5 \text{ s}, \Delta f_s=2$$



$$T=0,5859375 \text{ s}, \Delta f_s=1,70666$$



Configuration | Triggering | Advanced Timing | Logging

Channel Settings

- Acceleration
 - Acceleration_0
 - Acceleration_1

Click the Add Channels button (+) to add more channels to the task.

Acceleration Setup

Settings | Device | Calibration

Signal Input Range

Max: 5, Min: -5, Scaled Units: 9

Sensitivity: 100, Sex Source: Internal, Sex Value (A): 2m

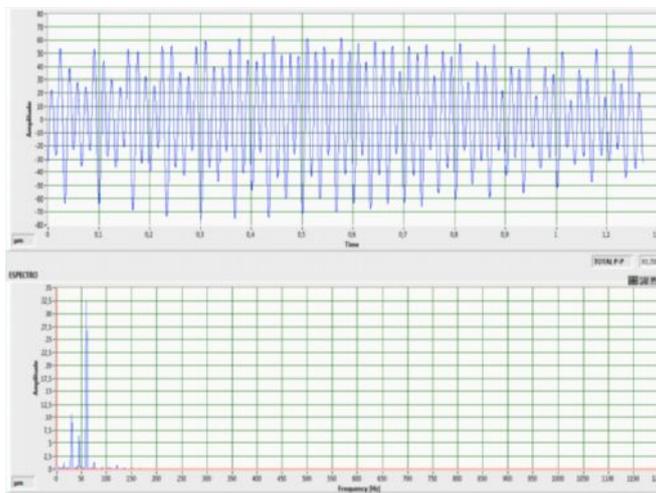
Sensitivity Units: mVolts/g, Terminal Configuration: Pseudodifferential

dB Reference: 1, Custom Scaling: <No Scale>

Timing Settings

Acquisition Mode: Continuous Samples, Samples to Read: 20k, Rate (Hz): 25.6k

$T=0,78125\text{ s}$, $\Delta T_s=1,28$



Configuration | Triggering | Advanced Timing | Logging

Channel Settings

- Acceleration
 - Acceleration_0
 - Acceleration_1

Click the Add Channels button (+) to add more channels to the task.

Acceleration Setup

Settings | Device | Calibration

Signal Input Range

Max: 5, Min: -5, Scaled Units: 9

Sensitivity: 100, Sex Source: Internal, Sex Value (A): 2m

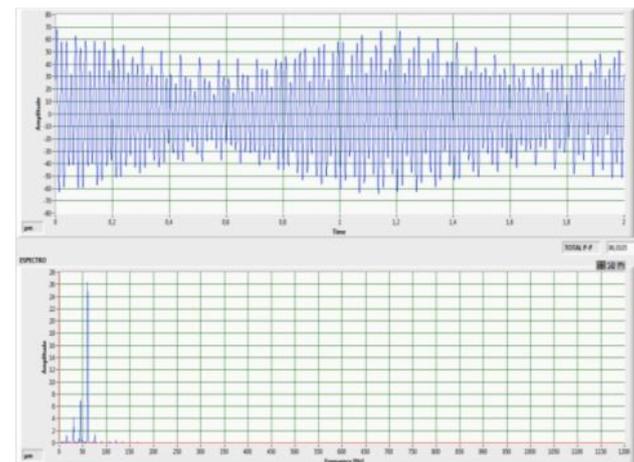
Sensitivity Units: mVolts/g, Terminal Configuration: Pseudodifferential

dB Reference: 1, Custom Scaling: <No Scale>

Timing Settings

Acquisition Mode: Continuous Samples, Samples to Read: 15k, Rate (Hz): 25.6k

$T=1,171875\text{ s}$, $\Delta T_s=0,85333333$



Configuration | Triggering | Advanced Timing | Logging

Channel Settings

- Acceleration
 - Acceleration_0
 - Acceleration_1

Click the Add Channels button (+) to add more channels to the task.

Acceleration Setup

Settings | Device | Calibration

Signal Input Range

Max: 5, Min: -5, Scaled Units: 9

Sensitivity: 100, Sex Source: Internal, Sex Value (A): 2m

Sensitivity Units: mVolts/g, Terminal Configuration: Pseudodifferential

dB Reference: 1, Custom Scaling: <No Scale>

Timing Settings

Acquisition Mode: Continuous Samples, Samples to Read: 51.2k, Rate (Hz): 25.6k

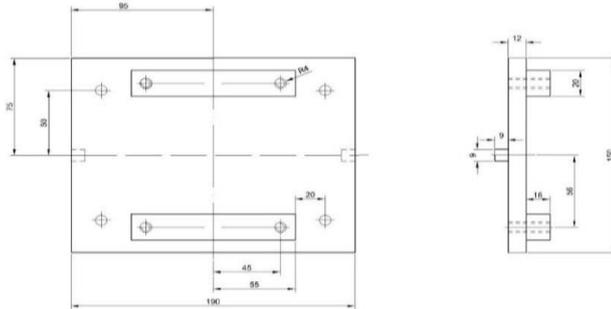
$T=2\text{ s}$, $\Delta T_s=0.5$

Fuente: Autores

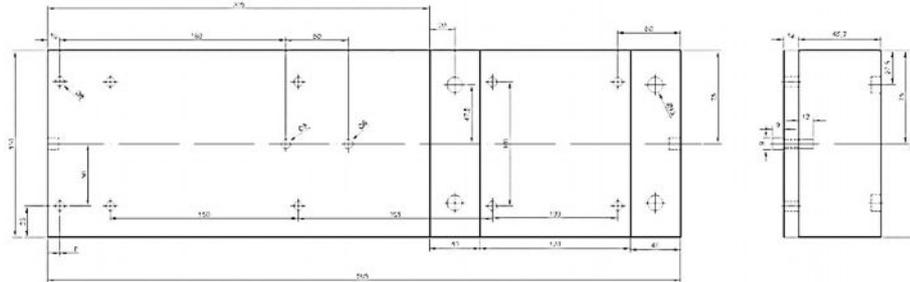
ANEXO C

Diseño de los simuladores

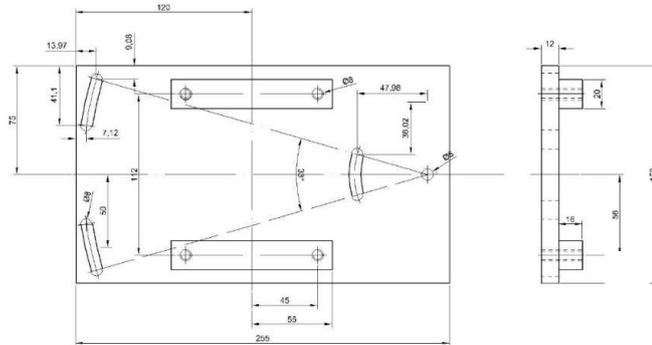
Placa de desalineación



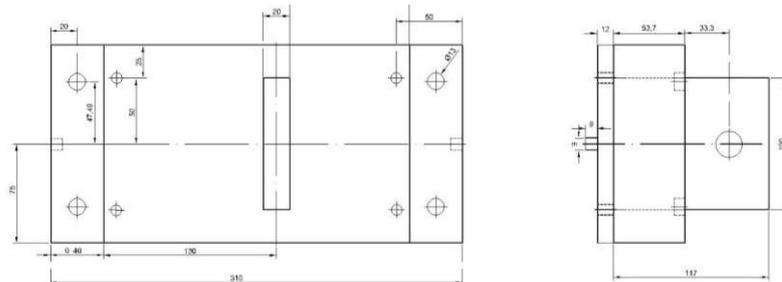
a) Placa guía



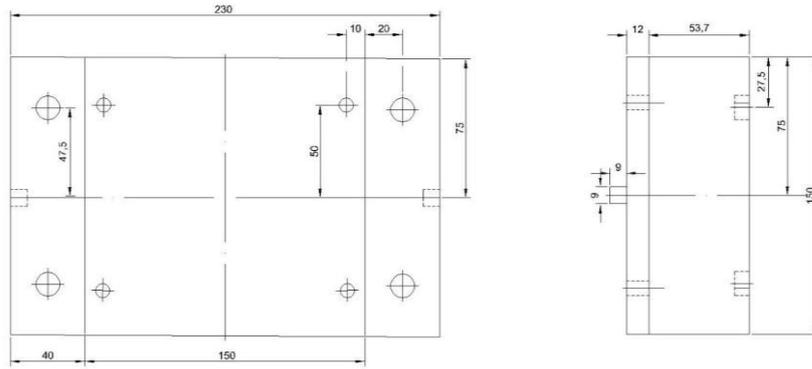
b) Placa de desalineación



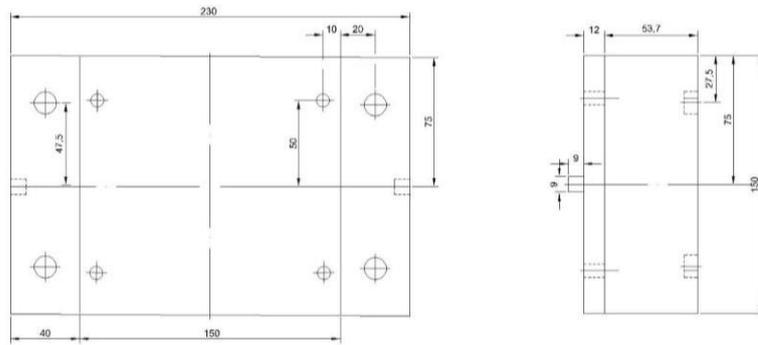
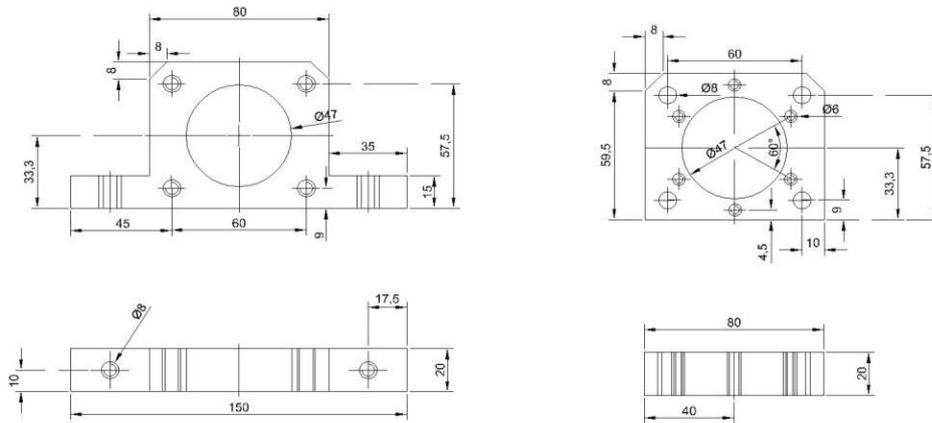
Placa de árbol elástico



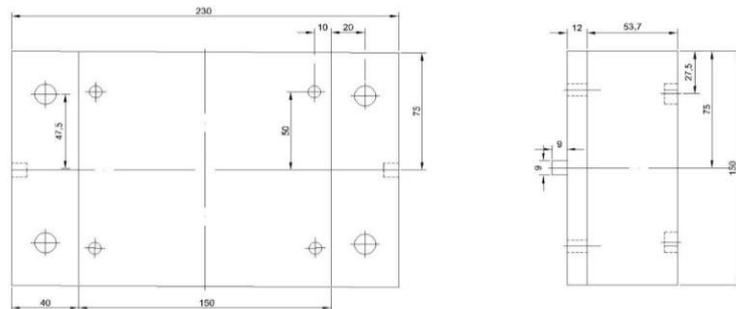
Placa del simulador de árbol elástico



Placa defectos en rodamientos



Placa eje fisurado



Fuente: Autores

ANEXO D

Tablas estadísticas y toma de muestras

Muestras de desplazamiento Viewer MAINTraq (μm)

152,4	137,5	137,0	144,8	144,6
140,3	129,8	124,2	130,9	139,1
134,2	132,8	122,7	125,7	126,4
120,6	134,6	149,4	127,6	139,8
143,9	146,2	149,6	146,9	136,4
146,0	138,9	151,8	143,2	127,6
148,7	129,0	138,5	131,5	126,3
123,4	127,7	119,6	124,6	142,2
127,2	146,9	118,2	137,8	147,2
136,9	149,9	144,3	132,2	151,3
136,2	142,3	144,9	129,8	141,5
142,3	128,4	132,9	129,5	123,7
134,7	127,7	128,8	143,2	119,6
130,0	117,3	138,9	149,3	137,7
133,9	153,1	135,7	152,6	141,9
137,7	143,3	133,3	144,4	142,1
134,7	139,9	128,4	126,9	136,3
130,9	123,6	135,9	122,5	139,1
141,8	130,1	156,3	142,1	142,5
136,7	151,9	159,0	149,6	138,3

Muestras de desplazamiento VISUALSpectrum (μm)

118,3	108,9	130,9	140,6	117,3
110,5	124,1	162,9	146,6	123,6
156,3	134,3	135,2	127,7	132,6
144,3	93,95	101,6	139,9	150,0
127,9	140,0	134,7	154,1	137,0
147,7	154,9	121,5	110,2	132,7
134,7	125,5	123,8	123,4	158,0
122,0	141,0	161,8	134,3	130,1
136,4	149,6	141,0	90,98	118,5
114,9	116,4	120,3	154,4	137,5
119,3	142,4	154,1	156,7	104,9
113,8	140,6	135,0	118,9	125,1
109,6	114,8	124,3	151,5	156,8
131,7	123,0	142,6	162,2	139,0
120,4	117,6	125,0	112,2	129,0
142,3	121,4	123,2	151,0	164,7
152,9	116,8	118,1	132,5	134,6
126,5	133,2	117,1	114,8	149,7
140,3	142,8	121,1	125,2	153,9
159,4	144,9	120,0	106,4	113,6

Muestras de velocidad Viewer MAINTraq (mm/s)

10,4	14,2	13,2	10,2	11,4
14,6	11,3	10,0	14,7	13,4
10,6	10,6	14,3	12,8	12,6
11,7	14,7	11,4	10,7	14,3
15,6	11,4	10,2	15,0	13,9
19,9	11,6	15,4	11,9	11,0
11,6	15,3	11,0	11,0	14,5
14,6	10,3	11,2	14,5	13,1
10,6	10,9	14,8	12,3	11,0
12,8	14,4	10,0	10,2	15,0
13,8	10,1	11,3	14,3	12,6
10,4	12,8	14,4	11,1	12,7
12,6	13,6	10,7	10,8	13,7
11,9	10,9	13,0	13,6	10,1
10,7	12,7	13,0	11,2	10,9
12,5	11,0	11,4	12,9	12,7
11,3	10,9	12,7	12,9	11,6
13,4	12,0	10,9	11,7	13,5
13,0	11,2	12,2	13,3	11,8
10,4	14,3	12,7	13,8	12,1

Muestras de velocidad VISUALspectrum (mm/s)

11,0	10,7	12,0	11,9	11,0
10,3	11,3	10,9	11,5	10,7
10,0	11,7	10,2	10,2	11,6
10,9	10,7	11,1	11,1	11,0
10,7	10,3	12,1	12,4	10,3
11,2	12,3	10,9	11,5	11,7
10,7	11,7	10,6	11,4	12,3
10,8	10,7	10,8	11,0	10,8
11,9	10,1	10,9	10,6	10,4
11,7	11,6	10,9	11,2	11,7
10,2	11,6	12,4	11,5	10,9
10,9	10,9	11,3	11,0	10,9
12,4	10,7	10,1	11,0	11,7
11,0	10,6	11,2	10,7	11,2
9,70	10,9	12,5	11,3	10,6
11,7	11,6	11,0	11,9	11,5
11,6	10,9	10,7	11,9	11,3
10,5	10,6	11,3	10,4	11,3
10,6	11,0	10,6	10,5	11,4
11,1	11,5	10,8	11,0	10,9

Muestras de aceleración Viewer MAINTraq (mm/s²)

0,548	0,447	0,481	0,486	0,449
0,448	0,467	0,444	0,444	0,539
0,507	0,412	0,543	0,551	0,576
0,485	0,458	0,487	0,448	0,403
0,462	0,484	0,532	0,448	0,479
0,467	0,543	0,554	0,594	0,563
0,484	0,408	0,414	0,457	0,392
0,489	0,421	0,483	0,533	0,532
0,563	0,592	0,583	0,604	0,577
0,419	0,426	0,403	0,409	0,421
0,519	0,548	0,536	0,454	0,475
0,607	0,552	0,593	0,572	0,525
0,436	0,383	0,428	0,441	0,415
0,495	0,418	0,532	0,534	0,519
0,485	0,599	0,566	0,545	0,447
0,433	0,441	0,421	0,447	0,532
0,514	0,491	0,459	0,533	0,516
0,598	0,553	0,554	0,499	0,445
0,423	0,431	0,485	0,452	0,537
0,519	0,416	0,533	0,518	0,484

Muestras de aceleración VISUALspectrum (mm/s²)

0,444	0,476	0,482	0,464	0,457
0,451	0,481	0,467	0,458	0,457
0,499	0,455	0,476	0,477	0,469
0,463	0,456	0,477	0,477	0,466
0,471	0,468	0,484	0,435	0,518
0,477	0,492	0,442	0,499	0,475
0,471	0,487	0,461	0,499	0,446
0,446	0,486	0,485	0,469	0,457
0,427	0,456	0,495	0,445	0,488
0,443	0,464	0,487	0,487	0,452
0,453	0,498	0,476	0,456	0,485
0,464	0,482	0,452	0,459	0,491
0,479	0,454	0,453	0,495	0,466
0,462	0,464	0,484	0,485	0,436
0,463	0,488	0,473	0,466	0,497
0,497	0,449	0,544	0,457	0,495
0,469	0,476	0,465	0,486	0,467
0,462	0,512	0,452	0,481	0,485
0,476	0,484	0,464	0,488	0,473
0,497	0,442	0,515	0,465	0,461

Tabla estadística de desplazamiento Viewer MAINTraq

Categorías		n	xi	$xi \times n$	$xi - \bar{X}$	$(xi - \bar{X})^2$	$(xi - \bar{X})^2 \times n$
90,98	101,511	3	96,246	192,491429	-34,107	1163,30109	2326,60218
101,511	112,043	7	106,777	747,44	-23,576	555,816998	3890,71899
112,043	122,574	23	117,309	2698,09714	-13,044	170,154881	3913,56225
122,574	133,106	21	127,840	2684,64	-2,513	6,31473821	132,609502
133,106	143,637	23	138,371	3182,54286	8,019	64,2965714	1478,82114
143,637	154,169	13	148,903	1935,73714	18,550	344,10038	4473,30494
154,169	164,700	10	159,434	1594,34286	29,081	845,726164	8457,26164
				13035,2914			24672,8807

Media \bar{X} 130,35 μm
 Desviación
 estándar S 15,7867 μm
 Cv 12,11 %

Tabla estadística de desplazamiento VISUALspectrum

Categorías		n	xi	$xi \times n$	$xi - \bar{X}$	$(xi - \bar{X})^2$	$(xi - \bar{X})^2 \times n$
117,3	123,257	7	120,279	841,95	-16,740	280,213252	1961,49276
123,257	129,214	18	126,236	2272,24286	-10,782	116,260766	2092,69379
129,214	135,171	17	132,193	2247,27857	-4,825	23,2833822	395,817498
135,171	141,129	21	138,150	2901,15	1,132	1,28110059	26,9031124
141,129	147,086	22	144,107	3170,35714	7,089	50,253921	1105,58626
147,086	153,043	12	150,064	1800,77143	13,046	170,201843	2042,42212
153,043	159,000	3	156,021	468,064286	19,003	361,124868	1083,3746
				13701,8143			8708,29014

Media \bar{X} 137,02 μm
 Desviación
 estándar S 9,3788 μm
 Cv 6,84 %

Tabla estadística de velocidad Viewer MAINTraq

Categorías		n	xi	$xi \times n$	$xi - \bar{X}$	$(xi - \bar{X})^2$	$(xi - \bar{X})^2 \times n$
9,024	9,963	9	9,494	85,44342857	-2,724	7,422044	66,798396
9,963	10,903	16	10,433	166,9302857	-1,785	3,18591901	50,9747041
10,903	11,842	22	11,373	250,1965714	-0,845	0,71484609	15,726614
11,842	12,782	13	12,312	160,056	0,094	0,00882526	0,11472839
12,782	13,721	18	13,251	238,5257143	1,033	1,06785651	19,2214172
13,721	14,661	13	14,191	184,4811429	1,973	3,89193984	50,5952179
14,661	15,600	9	15,130	136,1725714	2,912	8,48107525	76,3296773
				1221,805714			279,760755

Media \bar{X} 12,22 mm/s
 Desviación
 estándar S 1,6810 mm/s
 Cv 7,08 %

Tabla estadística de velocidad VISUALspectrum

Categorías		n	xi	$xi \times n$	$xi - \bar{X}$	$(xi - \bar{X})^2$	$(xi - \bar{X})^2 \times n$
9,772	10,169	3	9,970	29,9108571	-1,166	1,35936945	4,07810834
10,169	10,565	10	10,367	103,668571	-0,769	0,59189722	5,91897224
10,565	10,962	29	10,763	312,139429	-0,373	0,1389628	4,02992115
10,962	11,358	27	11,160	301,32	0,024	0,00056617	0,01528654
11,358	11,755	16	11,557	184,905143	0,420	0,17670733	2,82731734
11,755	12,151	9	11,953	107,578286	0,817	0,6673863	6,00647666
12,151	12,548	6	12,350	74,0982857	1,214	1,47260305	8,83561832
				1113,62057			31,7117006

Media \bar{X} 11,14 mm/s
 Desviación
 estándar S 0,5660 mm/s
 Cv 5,08 %

Tabla estadística de aceleración Viewer MAINTraq

Categorías		n	x_i	$x_i \times n$	$x_i - \bar{X}$	$(x_i - \bar{X})^2$	$(x_i - \bar{X}) \times n$
0,38	0,412	7	0,396	2,7735	-0,081	0,00662526	0,04637684
0,412	0,445	18	0,429	7,71557143	-0,049	0,00239778	0,04316006
0,445	0,477	17	0,461	7,83821429	-0,017	0,00027352	0,00464991
0,477	0,510	16	0,494	7,896	0,016	0,00025249	0,00403987
0,510	0,542	19	0,526	9,99264286	0,048	0,00233468	0,044359
0,542	0,575	13	0,558	7,25864286	0,081	0,0065201	0,08476131
0,575	0,607	10	0,591	5,90785714	0,113	0,01280874	0,12808742
				49,3824286			0,35543442

Media \bar{X} 0,49 mm/s²
 Desviación σ
 estándar S 0,0599 mm/s
 Cv 12,13%

Tabla estadística de aceleración VISUALspectrum

Categorías		n	x_i	$x_i \times n$	$x_i - \bar{X}$	$(x_i - \bar{X})^2$	$(x_i - \bar{X}) \times n$
0,427	0,440	3	0,434	1,3005	-0,037	0,00138235	0,00414706
0,440	0,453	14	0,447	6,251	-0,024	0,00058467	0,00818541
0,453	0,466	27	0,460	12,4065	-0,011	0,00012499	0,00337479
0,466	0,479	21	0,473	9,9225	0,002	3,3124E-06	6,956E-05
0,479	0,492	23	0,486	11,1665	0,015	0,00021963	0,00505155
0,492	0,505	9	0,499	4,4865	0,028	0,00077395	0,00696557
0,505	0,518	3	0,512	1,5345	0,041	0,00166627	0,00499882
				47,068			0,03279276

Media \bar{X} 0,47 mm/s²
 Desviación σ
 estándar S 0,018 mm/s
 Cv 3,87 %

Fuente: Autores

ANEXO E

Hojas de características técnicas

Instrumento		
Características	VIBRACHECK 200	Módulo NI 9234
Resolución	24 Bits	24 Bits
Rango Dinámico	105 dB	102 dB
Canales	2	4
Entrada	±22v	±5v
Acelerómetro		
Características	VIBRACHECK 200	Módulo NI 9234
Sensibilidad	100 mV/g	100 mV/g
Rango de medición	± 50 g	± 50 g
Temperatura	-50°C a 120°C	- 54 °C a 121 °C
Rango de Frecuencia	2Hz-10KHz	1Hz – 10 KHz

Fuente: IDEAR & NI

ANEXO F

Guía de Operación



Guía de Operación

CONTENIDO

	Pág.
PREPARACIÓN DEL HARDWARE	
Conexión Módulo de adquisición de datos NI 9234 a la PC.....	1
Conexión de acelerómetros al Módulo de adquisición de datos NI 9234.....	1
CONFIGURACIÓN	
Variables.....	2
Ventana.....	3
Configuración de espectros.....	3
MEDICIONES	
Medición de señales.....	4
Herramientas para el análisis en tiempo real.....	5



PREPARACIÓN DEL HARDWARE

- Conexión módulo de adquisición de datos ni 9234 a la pc

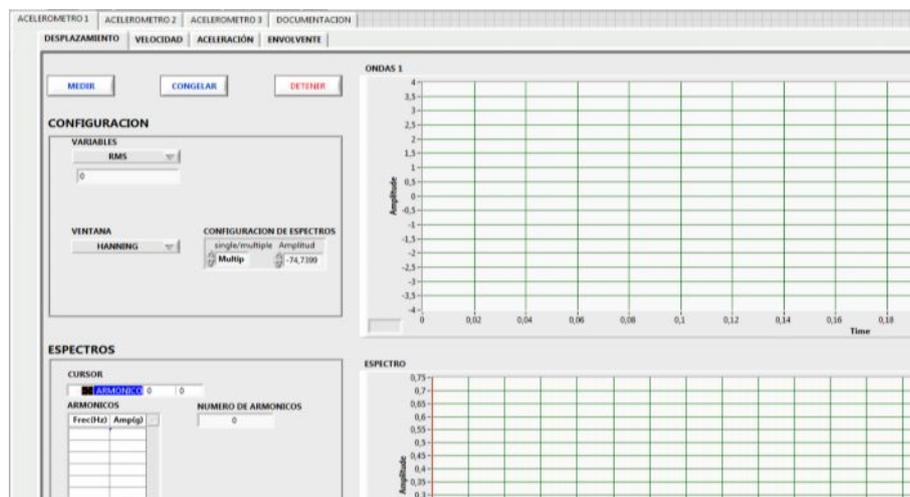
1. Inserte el módulo de adquisición de datos NI-9234 en el chasis NI DAQ-9171.
2. Conecte el conjunto desde el puerto del chasis NI DAQ-9171 a un puerto USB de la computadora mediante el cable de comunicación de datos.

- Conexión de acelerómetros al módulo de adquisición de datos ni 9234

1. Conecte los acelerómetros en los canales del 0 al 2, el acelerómetro conectado en el canal cero corresponde a la pestaña de acelerómetro 1 en el software y así sucesivamente.

Selección del tipo del parámetro a medir

Por defecto la aplicación abrirá en la pestaña principal ACELERÓMETRO 1 y en la pestaña secundaria DESPLAZAMIENTO, si desea observar otro parámetro solo cambie de pestaña antes de empezar con la medición o durante la misma.





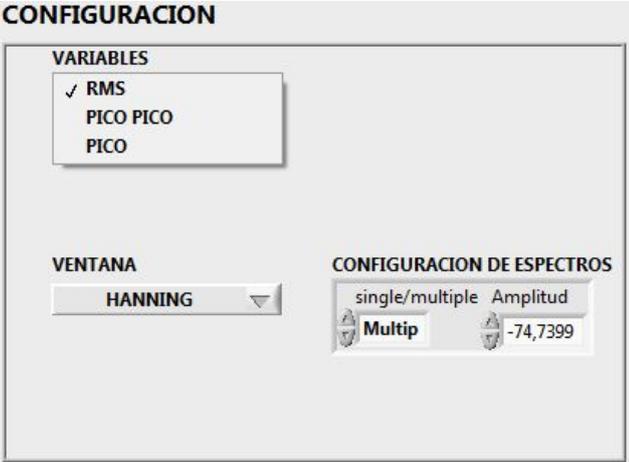
Cuando se desee analizar la envolvente se deberá ingresar los valores de la frecuencia máxima y mínima y la frecuencia máxima de impactos y mínima de impactos, esto deberá hacerse antes de empezar con las mediciones, de caso contrario se originará un error.



CONFIGURACIÓN

- Variables

En el menú de variables se puede seleccionar entre RMS, PICO-PICO y PICO, se lo puede hacer antes de medir o cuando se esté realizando la medición.





- Ventana

Por defecto al abrir la aplicación estará seleccionada HANNING, que es un tipo de ventana usado para visualizar los espectros en forma general. Se puede escoger el tipo de ventana entre HANNING, RECTANGULAR y FLAT TOP antes o durante la medición.



- Configuración de espectros

Durante la medición se ingresará el valor de amplitud base sobre la cual se desea realizar la búsqueda de espectros que se visualizarán en la tabla ESPECTROS.

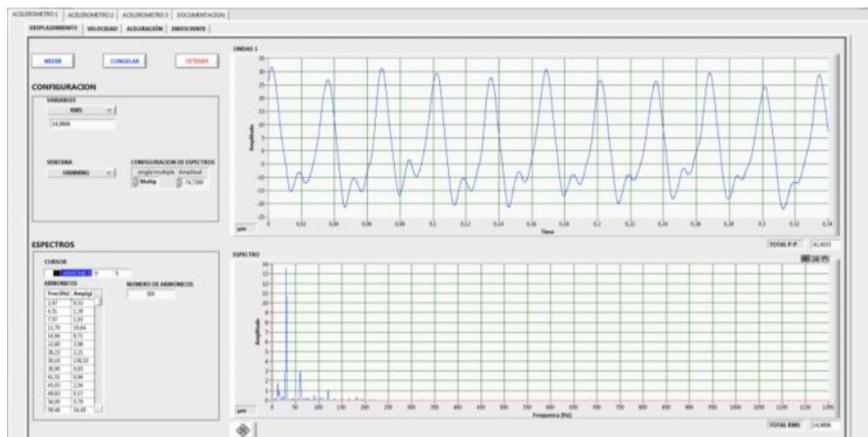




MEDICIONES

- Medición de señales

Después de la configuración se presionará el botón MEDIR, para empezar a adquirir y procesar datos, se ejecutarán la pestaña del acelerómetro y la subpestaña de la magnitud previamente seleccionadas. Sí durante la ejecución de la aplicación se desea analizar algún otro parámetro solo se deberá cambiar de pestaña y esta se ejecutará de inmediato.



Se cuenta con dos visualizadores gráficos, el primero muestra la forma de la onda y el segundo el espectro. En estos graficadores se podrá configurar la escala de las amplitudes. Por defecto la aplicación se ejecutará en auto escala, es decir el eje de amplitudes se autoajustara constantemente.





Para trabajar con una escala fija se deberá quitar la autoescala haciendo click derecho en el visualizador gráfico y deseleccionar autoescala Y, despues se deberá colocar una escala fija haciendo doble click izquierdo y digitando la escala.

Herramientas para el analisis en tiempo real

	<p>Seleccionamos los espectros que deseamos ver según su amplitud, introducimos el dato en threshold, previamente observando las amplitudes en la gráfica (dividir para 10).</p>
	<p>Nos permite manejar el cursor cuyos datos se mostrarán en el siguiente icono.</p>
	<p>Nos permite visualizar los datos de la ubicación del cursor y también podemos ubicarlo según los valores de frecuencia y amplitud que ingresemos.</p>
	<p>El curso también lo podemos mover con el puntero del mouse y visualizamos sus valores en el icono anterior.</p>
	<p>Selecciona el cursor</p>
	<p>Selecciona varios tipos de zoom y encuadre.</p>
	<p>Permite mover la grafica</p>
	<p>Detiene la presentación de la formas de onda y el espectro (aunque el sistema continúe midiendo).</p>

ANEXO G

Guías de Prácticas de Laboratorio



“Saber para ser”

ESPOCH

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

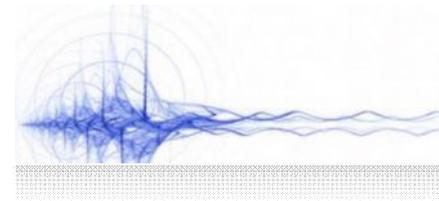
ESCUELA DE INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

GUÍA DE LABORATORIO DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO

TEMA: “DIAGNÓSTICO TÉCNICO - ÁRBOL CON FISURA”

PRÁCTICA No _____



1. DATOS GENERALES

NOMBRE:

CÓDIGO:

FECHA DE REALIZACIÓN:

FECHA DE ENTREGA:

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

- Identificar el comportamiento vibracional de un árbol con fisura

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

-
-
-

3. METODOLOGÍA

(Describir una metodología realizada para el desarrollo de la práctica)

.....
.....
.....
.....

4. EQUIPOS Y MATERIALES

4.1 EQUIPOS DE PROTECCIÓN PERSONAL

- Guantes de pupos
- Gafas de seguridad
- Mandil

4.2 EQUIPOS Y HERRAMIENTAS

- Motor Eléctrico
- Simulador de Árbol con Fisura
- Módulo NI-9234, Chasis NI cDAQ-9171
- Acelerómetros
- Computador
- Llaves Allen

4.3 MATERIALES

- Graseo

5. MARCO TEÓRICO

(Marco teórico relacionado con el modo de fallo mecánico. Evite el plagio ya que será considerado como fraude)

.....
.....

6. PROCEDIMIENTO

- 6.1 Seleccionar el motor eléctrico y el simulador de árbol con fisura
- 6.2 Montar los elementos sobre la placa perfilada, acoplarlos y ajustarlos
- 6.3 Lubricar las chumaceras
- 6.4 Conectar el Módulo NI-9234 y chasis NI cDAQ-9171 al computador
- 6.5 Colocar los acelerómetros sobre la chumacera
- 6.6 Energizar el motor eléctrico
- 6.7 Ejecutar la aplicación VISUALspectrum y medir el nivel de vibración en la magnitud de desplazamiento y velocidad.

7. RESULTADOS

7.1 GRÁFICAS OBTENIDAS

- **Formas de Onda** (Desplazamiento)

Onda de árbol sin fisura (atornillados todos los pernos)

Onda de árbol con fisura mínima (sin un perno)

Onda de árbol con fisura máxima (sin cuatro pernos)

- **Espectros**

Espectro de árbol sin fisura (atornillados todos los pernos)

Espectro de árbol con fisura mínima (sin un perno)

Espectro de árbol con fisura máxima (sin cuatro pernos)

7.2 TABLA DE RESULTADOS

Tabla de amplitudes de vibración [mm/s]

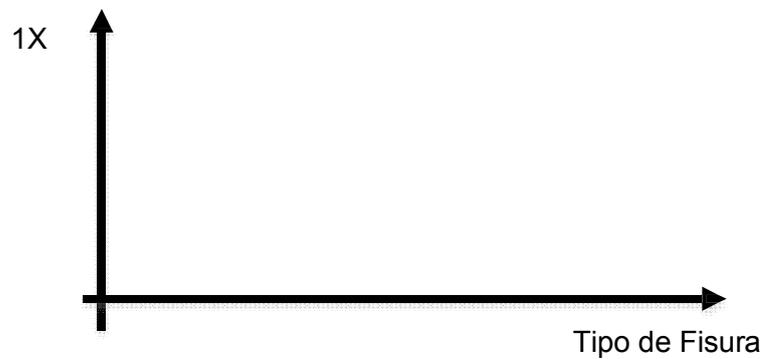
ARMÓNICOS	SIN FISURA	FISURA MINIMA	FISURA MAXIMA
Global (V_{RMS})			
1X			
2X			
3X			

7.3 GRÁFICAS DE TENDENCIAS

- V_{RMS} vs Tipo de Fisura



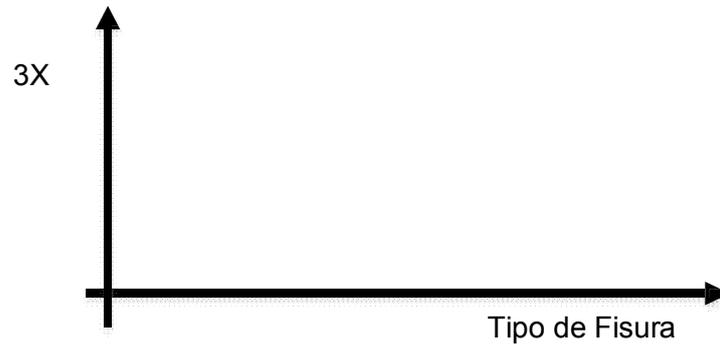
- 1X vs Tipo de Fisura



- 2X vs Tipo de Fisura



- 3X vs Tipo de Fisura



7.4 PREGUNTAS

¿Cuál es la forma de la onda?

¿Cuáles son las frecuencias de los armónicos presentes en cada tipo de fisura?

¿Cuántos armónicos se presentan en cada tipo de fisura?

¿Cómo se reconoce un árbol con fisura mediante el análisis espectral?

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

-
.....
-
.....
-
.....

9. BIBLIOGRAFÍA

(Citar fuente bibliográfica general y específica que sustentan la práctica)

ANEXOS

Planos

ESTUDIANTE

REVISADO



“Saber para ser”

ESPOCH

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

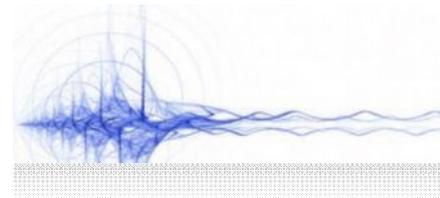
ESCUELA DE INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

GUÍA DE LABORATORIO DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO

TEMA: “DIAGNÓSTICO TÉCNICO - DEFECTOS EN
RODAMIENTOS”

PRÁCTICA No _____



1. DATOS GENERALES

NOMBRE:

CÓDIGO:

FECHA DE REALIZACIÓN:

FECHA DE ENTREGA:

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

- Identificar el comportamiento vibracional en distintos defectos de rodamientos

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

-
-
-

2. METODOLOGÍA

(Describir una metodología realizada para el desarrollo de la práctica)

.....
.....
.....
.....

3. EQUIPOS Y MATERIALES

4.1 EQUIPOS DE PROTECCIÓN PERSONAL

- Guantes de pupos
- Gafas de seguridad
- Mandil

4.2 EQUIPOS Y HERRAMIENTAS

- Motor Eléctrico
- Simulador de Defectos en Rodamientos
- Módulo NI-9234, Chasis NI cDAQ-9171
- Acelerómetros
- Computador
- Llave Allen

4.3 MATERIALES

- Graseo

4. MARCO TEÓRICO

(Marco teórico relacionado con el modo de fallo mecánico. Evite el plagio ya que será considerado como fraude)

.....
.....
.....

5. PROCEDIMIENTO

- 6.1 Seleccionar el simulador de defectos en rodamientos y el motor eléctrico
- 6.2 Colocar los elementos sobre la placa perfilada, acoplarlos y ajustarlos con las llaves Allen.
- 6.3 Lubricar las chumaceras
- 6.4 Conectar el Módulo NI-9234 a los acelerómetros y al computador
- 6.5 Energizar el motor eléctrico
- 6.6 Colocar los acelerómetros sobre el porta-rodamientos
- 6.7 Ejecutar la aplicación VISUALspectrum y analizar la magnitud envolvente
- 6.8 Detener el motor, cambiar de rodamientos y analizar cada tipo de falla

6. CÁLCULOS Y RESULTADOS

7.1 GRÁFICAS

- **Formas de Onda** (Desplazamiento)

Onda de desplazamiento sin falla

Onda de desplazamiento con fallas

- **Espectros de velocidad, aceleración y envolvente**

Espectros de velocidad, aceleración y envolvente sin falla

Espectros de velocidad, aceleración y envolvente con fallas

Tipos de falla en los rodamientos:

- a) Rodamiento sin falla
- b) Rodamiento con defectos en la pista externa
- c) Rodamiento con defectos en la pista interna
- d) Rodamiento con defectos en el elemento rodante, aro exterior y aro interior
- e) Rodamiento con defecto en el elemento rodante
- f) Rodamiento muy desgastado

7.2 TABLA DE RESULTADOS

ARMÓNICOS	Tipos de falla en el rodamiento					
	Sin falla	Pista	Pista	Aro exterior	Elemento	Desgaste
Global (VRMS)						
1X						
2X						
3X						
Frecuencias de						
Frecuencia						

7.3 CÁLCULOS

Calcular las frecuencias de falla en los rodamientos:

Un rodamiento con defectos generará vibraciones con 4 componentes:

$$DFI = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{P} (BPF) \theta \right) x P$$

$$DFE = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{P} (BPE) \theta \right) x P$$

$$F = \frac{P}{2} \left(1 - \left(\frac{1}{P} (BPF) \theta \right)^2 \right) x P$$

$$F = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{P} (BPE) \theta \right) x P$$

Donde:

BPF= Frecuencia de la Pista Interna

BPE= Frecuencia de la Pista Externa

BSF= Frecuencia de Giro del Elemento Rodante

FTF= Frecuencia Fundamental de la Jaula

Nb= Número de elementos rodantes

Bd= Diámetro de la bola

Pd= Módulo de rodamientos

Θ = Angulo de contacto (grados)

7.4 PREGUNTAS

¿En qué consiste la técnica de la Envolvente?

¿Cuáles son las frecuencias de los armónicos presentes en cada tipo de fallo?

¿Cuántos armónicos predominantes se presentan en cada tipo de fallo?

¿De qué depende la frecuencia de la falla en los rodamientos?

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

-
.....
-
.....
-
.....

9. BIBLIOGRAFÍA

(Citar fuente bibliográfica general y específica que sustentan la práctica)

ANEXOS

Planos

Cuestionario de evaluación

ESTUDIANTE

REVISADO



“Saber para ser”

ESPOCH

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

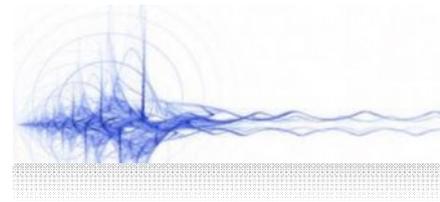
ESCUELA DE INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

GUÍA DE LABORATORIO DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO

TEMA: “DIAGNÓSTICO TÉCNICO - DESALINEACIÓN”

PRÁCTICA No _____



1. DATOS GENERALES

NOMBRE:

CÓDIGO:

FECHA DE REALIZACIÓN:

FECHA DE ENTREGA:

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

- Identificar el comportamiento vibracional en la desalineación

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

-
-
-

3. METODOLOGÍA

(Describir una metodología realizada para el desarrollo de la práctica)

.....
.....
.....
.....

4. EQUIPOS Y MATERIALES

4.1 EQUIPOS DE PROTECCIÓN PERSONAL

- Guantes de pupos
- Gafas de seguridad
- Mandil

4.2 EQUIPOS Y HERRAMIENTAS

- Simulador de desalineación
 - Placa guía de desalineación
 - Placa de desalineación
- Módulo NI-9234, Chasis NI cDAQ-9171
- Acelerómetros
- Computador
- Llaves Allen

4.3 MATERIALES

- Graseo

5. MARCO TEÓRICO

(Marco teórico relacionado con la desalineación angular. Evite el plagio ya que será considerado como fraude)

.....
.....
.....
.....

6. PROCEDIMIENTO

- 6.1 Seleccionar el simulador de desalineación
- 6.2 Montar los elementos sobre la placa perfilada, acoplarlo y ajustarlo (llaves Allen)
- 6.3 Lubricar las chumaceras
- 6.4 Conectar el Módulo NI-9234 a los acelerómetros y al computador
- 6.5 Energizar el motor eléctrico
- 6.5 Colocar los acelerómetros sobre la chumacera
- 6.6 Ejecutar la aplicación VISUALspectrum y medir la vibración en la magnitud de desplazamiento
- 6.7 Medir la velocidad de giro del motor con el fototacómetro
- 6.8 Calcular el 1x, 2x, 3x respectivos acorde a la velocidad de giro del motor
- 6.9 Comparar la forma de los espectros obtenidos con los del modo de fallo de desalineación angular de las cartas de Charlotte

7. RESULTADOS

7.1 GRÁFICAS OBTENIDAS

- **Formas de Onda** (Desplazamiento)

Onda de desplazamiento desalineación paralela

Onda de desplazamiento desalineación angular

Onda de desplazamiento desalineación combinada

- **Espectros**

Espectros de desplazamiento y velocidad desalineación paralela

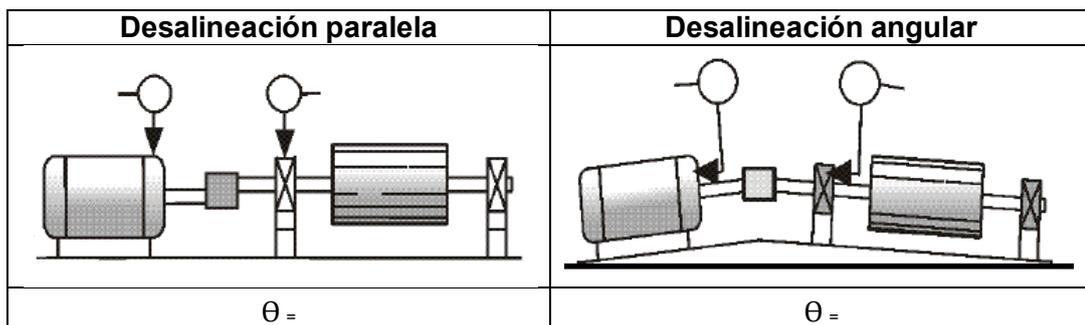
Espectros de desplazamiento y velocidad desalineación angular

Espectros de desplazamiento y velocidad desalineación combinada

7.2 TABLA DE RESULTADOS

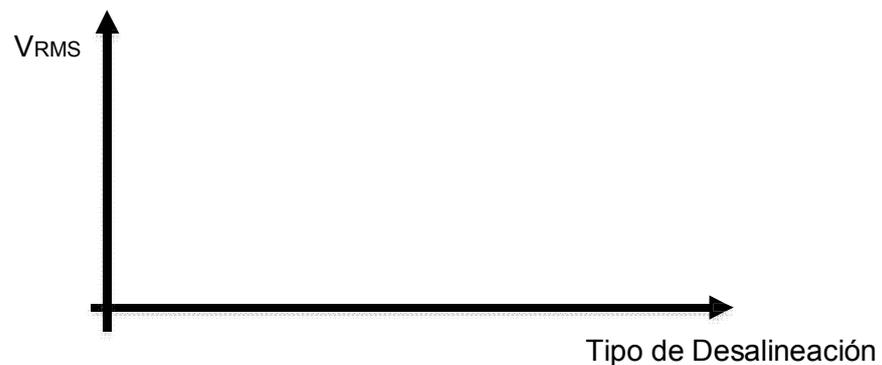
ARMÓNICOS	Tipo de Desalineación		
	Paralela	Angular	Combinada
Global (V_{RMS})			
1X			
2X			
3X			
Otros			

7.3 ÁNGULOS DE FASE

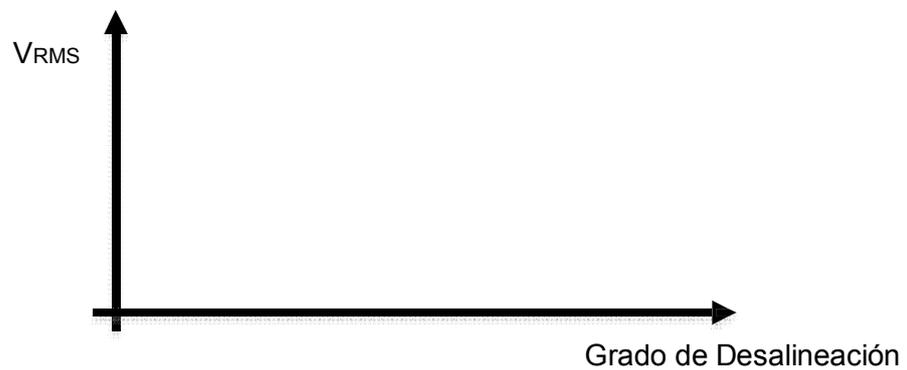


7.4 GRÁFICAS DE TENDENCIAS

- V_{RMS} vs Tipo de Desalineación



- VRMS vs Grado de Desalineación



7.5 PREGUNTAS

¿Cuántos armónicos predominantes se presentan en cada tipo de desalineación?

¿Cómo se reconoce la desalineación mediante el análisis espectral?

¿Qué características presentan los armónicos en cada tipo de desalineación?

¿A qué consecuencias conlleva un equipo desalineado?

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

-
-

9. BIBLIOGRAFÍA

(Citar fuente bibliográfica general y específica que sustentan la práctica)

ANEXOS

Planos

Cuestionario de evaluación

ESTUDIANTE

REVISADO



“Saber para ser”

ESPOCH

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

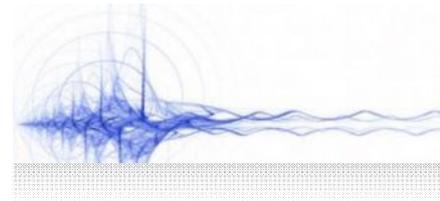
ESCUELA DE INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

GUÍA DE LABORATORIO DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO

TEMA: “DIAGNÓSTICO TÉCNICO – DESBALANCEO”

PRÁCTICA No _____



1. DATOS GENERALES

NOMBRE:

CÓDIGO:

FECHA DE REALIZACIÓN:

FECHA DE ENTREGA:

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

- Identificar el comportamiento vibracional de un sistema desbalanceado

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

-
-
-

3. METODOLOGÍA

(Describir una metodología realizada para el desarrollo de la práctica)

.....
.....
.....
.....

4. EQUIPOS Y MATERIALES

4.1 EQUIPOS DE PROTECCIÓN PERSONAL

- Guantes de pupos
- Gafas de seguridad
- Mandil

4.2 EQUIPOS Y HERRAMIENTAS

- Motor Eléctrico
- Simulador de Desequilibrio
- Módulo NI-9234, Chasis NI cDAQ-9171
- Acelerómetros
- Computador
- Llaves Allen

4.3 MATERIALES

- Masas de desbalanceo
- Graseo

5. MARCO TEÓRICO

(Marco teórico relacionado con el modo de fallo mecánico. Evite el plagio ya que será considerado como fraude)

.....

.....

.....

.....

.....

6. PROCEDIMIENTO

- 6.1 Seleccionar el motor eléctrico y el simulador de desbalanceo
- 6.2 Montar los elementos sobre la placa perfilada, acoplarlos y ajustarlos (llaves Allen)
- 6.3 Lubricar las chumaceras
- 6.4 Conectar el Módulo NI-9234 a los acelerómetros y al computador
- 6.5 Energizar el motor eléctrico
- 6.6 Colocar los acelerómetros sobre la chumacera
- 6.7 Ejecutar el software VISUALspectrum
- 6.8 Analizar los espectros obtenidos de la aplicación

7. CÁLCULOS Y RESULTADOS

7.1 GRÁFICAS OBTENIDAS

- **Formas de Onda**

Onda de desplazamiento sin masa de desbalanceo

Onda de desplazamiento desbalanceo estático

Onda de desplazamiento desbalanceo dinámico

Onda de desplazamiento desbalance tipo par

▪ **Espectros**

Espectro de desplazamiento sin masa de desbalanceo

Espectro de desplazamiento desbalanceo estático

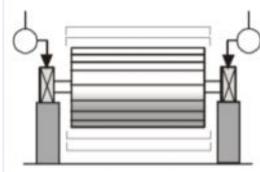
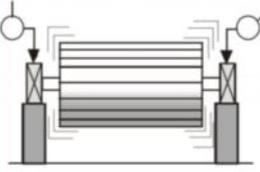
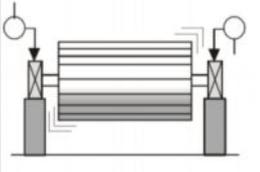
Espectro de desplazamiento desbalanceo dinámico

Espectro de desplazamiento desbalanceo tipo par

7.2 TABLA DE RESULTADOS

ARMÓNICOS	Tipo de Desbalanceo		
	Estático	Dinámico	Tipo par
Global (VRMS)			
1X			
Masa de desbalanceo			

7.3 ÁNGULOS DE FASE

Desbalanceo Estático	Desbalanceo Dinámico	Desbalanceo Tipo Par
		
$\theta =$	$\theta =$	$\theta =$

7.4 CÁLCULOS

- $\frac{V}{2\pi} = \frac{A}{(2\pi)^2}$
- $V = 2\pi A = \frac{A}{2\pi}$
- $a = (2\pi)^2 V = 2\pi V$

Magnitudes	Sin masas de desbalanceo	Desbalanceo Estático	Desbalanceo Dinámico	Desbalanceo Tipo Par
Desplazamiento (um)				
Pico				
RMS				
Velocidad (mm/s)				
Pico				
RMS				
Aceleración (g)				
Pico				
RMS				

7.5 PREGUNTAS

¿Cuántos armónicos predominantes se presentan en el desbalanceo?

¿Cómo se reconoce un equipo desbalanceado mediante el análisis espectral?

¿Qué nos indica el ángulo de fase?

¿Cómo influyen las masas de desbalanceo en los espectros?

¿Cuáles son las consecuencias que tiene un equipo desbalanceado?

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

-
.....
-
.....
-
.....

8. BIBLIOGRAFÍA

(Citar fuente bibliográfica general y específica que sustentan la práctica)

ANEXOS

Planos

Cuestionario de evaluación

ESTUDIANTE

REVISADO



“Saber para ser”

ESPOCH

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

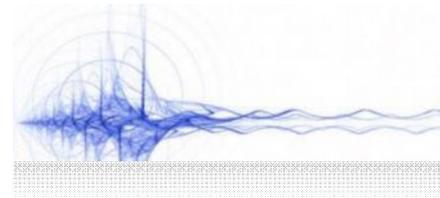
ESCUELA DE INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

GUÍA DE LABORATORIO DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO

TEMA: “DIAGNÓSTICO TÉCNICO – ÁRBOL ELÁSTICO”

PRÁCTICA No _____



1. DATOS GENERALES

NOMBRE:

CÓDIGO:

FECHA DE REALIZACIÓN:

FECHA DE ENTREGA:

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

- Identificar el comportamiento vibracional de un árbol elástico

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

-
-
-

3. METODOLOGÍA

(Describir una metodología realizada para el desarrollo de la práctica)

.....
.....
.....

4. EQUIPOS Y MATERIALES

4.1 EQUIPOS DE PROTECCIÓN PERSONAL

- Guantes de pupos
- Gafas de seguridad
- Mandil

4.2 EQUIPOS Y HERRAMIENTAS

- Motor Eléctrico
- Simulador de Árbol Elástico
- Módulo NI-9234, Chasis NI cDAQ-9171
- Acelerómetros
- Computador
- Llaves Allen

4.3 MATERIALES

- Graseo

5. MARCO TEÓRICO

(Marco teórico relacionado con el modo de fallo mecánico. Evite el plagio ya que será considerado como fraude)

.....

.....

.....

.....

6. PROCEDIMIENTO

- 6.1 Seleccionar el motor eléctrico y el simulador de Árbol Elástico
- 6.2 Montar los elementos sobre la placa perfilada, acoplarlos y ajustarlos (usar hexagonal # 14)
- 6.3 Lubricar las chumaceras
- 6.4 Conectar el Módulo NI-9234 y chasis NI cDAQ-9171 al computador
- 6.5 Colocar los acelerómetros sobre la chumacera
- 6.6 Energizar el motor eléctrico
- 6.7 Ejecutar el software VISUALspectrum
- 6.8 Analizar las formas de onda y espectros obtenidos

7. RESULTADOS

7.1 GRÁFICAS OBTENIDAS

- Forma de Onda en Desplazamiento
- Diagrama de Bode y Polar

7.2 TABLA DE RESULTADOS

ARMÓNICOS	
Global (VRMS)	
1X	

7.3 PREGUNTAS

¿Cuántos armónicos predominantes están presentes cuando existe árbol elástico?

¿Qué representa y como se interpreta el diagrama de Bode?

¿Qué representa el diagrama el diagrama Polar?

¿Cuáles son las consecuencias de este modo de fallo?

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

-
.....
-
.....
-
.....

9. BIBLIOGRAFÍA

(Citar fuente bibliográfica general y específica que sustentan la práctica)

ANEXOS

Planos

Cuestionario de evaluación

ESTUDIANTE

REVISADO

