



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y REDES**  
**INDUSTRIALES**

**“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO DE**  
**ANÁLISIS VIBRACIONAL PARA EL MANTENIMIENTO**  
**PREDICTIVO EN MOTORES ELÉCTRICOS”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN**  
**TIPO: PROYECTO TÉCNICO**

Presentado para optar al grado académico de:  
**INGENIERO EN ELECTRÓNICA CONTROL Y REDES**  
**INDUSTRIALES**

**AUTORES: FERNÁNDEZ ROMERO LUIS EDUARDO**  
**TOAPANTA GRANIZO JEFFERSON PATRICIO**

**DIRECTOR: ING. MARCO ANTONIO VITERI BARRERA**

Riobamba – Ecuador  
2019

**©2019, Luis Eduardo Fernández Romero, Jefferson Patricio Toapanta Granizo.**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Nosotros **Luis Eduardo Fernández Romero** y **Jefferson Patricio Toapanta Granizo**, declaramos que el presente trabajo es de nuestra auditoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 06 de diciembre del 2019

**Luis Eduardo Fernández Romero**  
**1103966139**

**Jefferson Patricio Toapanta Granizo**  
**0603973470**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y REDES**  
**INDUSTRIALES**

El tribunal del trabajo de titulación certifica que: El trabajo de titulación: Tipo: Proyecto Técnico, **“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO DE ANÁLISIS VIBRACIONAL PARA EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN MOTORES ELÉCTRICOS”**, realizado por los señores: **LUIS EDUARDO FERNÁNDEZ ROMERO Y JEFFERSON PATRICIO TOAPANTA GRANIZO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del tribunal del trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Ing. Jorge Hernández; Ph.D. <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>	_____	2019-12-06
Ing. Marco Viteri <b>DIRECTOR DE TRABAJO</b> <b>DE TITULACIÓN</b>	_____	2019-12-06
Ing. Fausto Cabrera <b>MIEMBRO DEL TRIBUNAL</b>	_____	2019-12-06

## **DEDICATORIA**

Le quiero dedicar este logro en primer lugar a Dios, quien me supo dar fe, valor, optimismo y esperanza en los momentos más difíciles en mi carrera, a mis padres por apoyarme desde el primer momento en el cual decidí iniciar con esta formación profesional, a pesar de la distancia, siempre estuvieron a mi lado en cada paso y decisión que tomé, siendo el pilar fundamental y motor de mi vida. A mis hermanas por enseñarme que no todo en esta vida es fácil, lo cual debo aprender a levantarme cada vez que caiga, sin duda el apoyo brindado por ellas siempre lo llevaré en mi corazón. Finalmente, a mis abuelitos, quienes siempre me cuidaron e iluminaron desde el cielo, recordando siempre la frase que me dijo uno ellos, la cual decía “mejores tiempos vendrán”.

Luis Eduardo Fernández Romero

Principalmente quiero dedicar este gran logro a mi madre quien siempre estuvo a mi lado en mis mejores y peores momentos brindándome su apoyo incondicional y ánimos para nunca rendirme, además a mis dos padres quienes también estuvieron ahí brindándome sus consejos los cuales serán de gran ayuda para mi vida profesional, mis hermanas quienes pasamos muchos momentos durante esta etapa los cuales siempre los tendré presente, a mis tíos, primos quienes de una u otra manera creyeron en mí, estuvieron presentes en cada triunfo, derrota pero siempre diciendo que soy capaz de lograr cualquier cosa que no me rinda, pero sobre todo que sea una persona humilde, porque gracias a eso lograré llegar muy lejos.

Jefferson Patricio Toapanta Granizo

## **AGRADECIMIENTO**

Mi más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a la Escuela de Ingeniería en Electrónica, Control y Redes Industriales por abrirme las puertas a una nueva etapa profesional, sin duda será un camino largo y difícil, pero por eso nos formaron, para resolver los problemas que día a día se nos presenten.

De igual manera a mis profesores, que además de empaparnos con sus conocimientos, nos enseñaron a ser buenos profesionales. Por último, a todos mis amigos y compañeros, en los cuales siempre pude confiar y aprender.

Luis Eduardo Fernández Romero

Quiero agradecer a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a la Escuela de Ingeniería en Electrónica, Control y Redes, por haberme brindado la oportunidad de forjarme, para la nueva etapa profesional que se viene, la cual no será fácil, pero con lo aprendido se podrá llegar lejos, triunfando como un gran profesional.

Además, para todos los profesores que supieron impartir sus conocimientos adecuadamente y en especial a mis amigos, compañeros quienes forman una parte importante en la vida universitaria, porque de una u otra manera me brindaron su apoyo y su amistad para nunca rendirme y culminar con éxito esta grandiosa etapa.

Jefferson Patricio Toapanta Granizo

## TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE ECUACIONES .....	xiii
ÍNDICE DE ANEXOS .....	xiv
ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....	xv
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT .....	xvii
INTRODUCCIÓN .....	1

## CAPÍTULO I

<b>1</b>	<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>4</b>
<b>1.1</b>	<b>Mantenimiento .....</b>	<b>4</b>
<b>1.1.1</b>	<b><i>Tipos de Mantenimiento</i>.....</b>	<b>4</b>
1.1.1.1	<i>Mantenimiento Correctivo</i> .....	4
1.1.1.2	<i>Mantenimiento Preventivo</i> .....	5
1.1.1.3	<i>Mantenimiento Predictivo</i> .....	5
<b>1.2</b>	<b>Principios del análisis vibracional.....</b>	<b>6</b>
<b>1.2.1</b>	<b><i>Definición de vibración</i> .....</b>	<b>7</b>
<b>1.2.2</b>	<b><i>Elementos de una vibración</i>.....</b>	<b>7</b>
1.2.2.1	<i>Amplitud</i> .....	7
1.2.2.2	<i>Frecuencia</i> .....	8
1.2.2.3	<i>Fase</i> .....	8
<b>1.2.3</b>	<b><i>Análisis Vibracional</i>.....</b>	<b>9</b>
1.2.3.1	<i>Vibración Simple</i> .....	9
1.2.3.2	<i>Vibración compuesta</i> .....	10
1.2.3.3	<i>La transformada rápida de Fourier (FFT)</i> .....	10
1.2.3.4	<i>Sentidos principales de medición</i> .....	11
<b>1.2.4</b>	<b><i>Espectros Utilizados para el diagnóstico de la máquina</i>.....</b>	<b>12</b>
1.2.4.1	<i>Desequilibrio</i> .....	12
1.2.4.2	<i>Desalineación</i> .....	14
1.2.4.3	<i>Soltura Estructural</i> .....	15
<b>1.2.5</b>	<b><i>Norma de severidad ISO 2372</i> .....</b>	<b>15</b>
<b>1.3</b>	<b>Transductores de Vibración .....</b>	<b>16</b>
<b>1.3.1</b>	<b><i>Tipos de acelerómetros</i>.....</b>	<b>17</b>

1.3.2	<i>Criterios de selección de acelerómetros</i> .....	19
1.4	<b>Introducción a Motores Eléctricos</b> .....	19
1.4.1	<i>Funcionamiento</i> .....	20
1.4.2	<i>Partes</i> .....	20
1.5	<b>Tarjeta de control y adquisición de datos</b> .....	22
1.6	<b>Tipos de comunicación</b> .....	23
1.7	<b>Equipos comerciales de análisis vibracional</b> .....	23
1.7.1	<i>Trazabilidad del acelerómetro ICP 603C01</i> .....	24
1.7.1.1	<i>Teoría de la calibración consecutiva</i> .....	25

## CAPITULO II

2	<b>MARCO METODOLÓGICO</b> .....	28
2.1	<b>Introducción</b> .....	28
2.2	<b>Requerimientos del sistema</b> .....	29
2.3	<b>Descripción del sistema</b> .....	29
2.4	<b>Selección de elementos</b> .....	30
2.4.1	<i>Selección de elementos mecánicos</i> .....	30
2.4.1.1	<i>Selección del motor</i> .....	30
2.4.1.2	<i>Selección de chumaceras</i> .....	31
2.4.1.3	<i>Selección de acople mecánico</i> .....	32
2.4.1.4	<i>Selección de polea</i> .....	33
2.4.2	<i>Selección de elementos electrónicos</i> .....	33
2.4.2.1	<i>PLC RIEVTECH EXM-12DC-DA-RT-GWIFI</i> .....	33
2.4.2.2	<i>Acelerómetro ADXL355</i> .....	34
2.4.2.3	<i>Selección de tarjeta de adquisición de datos</i> .....	35
2.5	<b>Modelación y montaje de los elementos del banco de pruebas</b> .....	36
2.5.1	<i>Diseño de la base principal</i> .....	36
2.5.2	<i>Diseño de acople mecánico</i> .....	37
2.5.3	<i>Diseño del sistema de control y electrónico</i> .....	37
2.5.4	<i>Montaje y visualización virtual del banco de pruebas</i> .....	39
2.6	<b>Etapa de adquisición de datos</b> .....	40
2.7	<b>Etapa de desarrollo de la herramienta software</b> .....	42
2.7.1	<i>Programación del PLC</i> .....	42
2.7.2	<i>Programación de la interfaz en el software LabVIEW</i> .....	44
2.7.2.1	<i>Configuración MODBUS TCP</i> .....	44
2.7.2.2	<i>Desarrollo de la interfaz del sistema en LabVIEW</i> .....	46
2.8	<b>Etapa de presentación de datos</b> .....	49

## CAPITULO III

<b>3</b>	<b>MARCO DE RESULTADOS, DISCUSIÓN Y ANÁLISIS .....</b>	<b>53</b>
<b>3.1</b>	<b>Validación del funcionamiento del sistema .....</b>	<b>53</b>
<b>3.1.1</b>	<b><i>Comparación del sistema Predictive Vibration Analysis con VIBRAcheck 200.....</i></b>	<b>53</b>
3.1.1.1	<i>Comparación formas de onda .....</i>	54
3.1.1.2	<i>Comparación espectros.....</i>	60
<b>3.1.2</b>	<b><i>Prueba estadística de datos para validación del sistema.....</i></b>	<b>66</b>
<b>3.2</b>	<b>Prueba de recepción de mensajes de los niveles de severidad del sistema.....</b>	<b>68</b>
<b>3.3</b>	<b>Elaboración del plan de mantenimiento .....</b>	<b>70</b>
<b>3.3.1</b>	<b><i>Selección de las frecuencias de inspección .....</i></b>	<b>70</b>
<b>3.3.2</b>	<b><i>Reporte de análisis vibracional.....</i></b>	<b>70</b>
<b>3.4</b>	<b>Consumo de energía del sistema PVA .....</b>	<b>73</b>
<b>3.5</b>	<b>Análisis de costos .....</b>	<b>74</b>
	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>75</b>
	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>76</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
	<b>ANEXOS</b>	

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-1:</b>	Norma de severidad ISO 2372 .....	16
<b>Tabla 2-1:</b>	Tipos de acelerómetro .....	19
<b>Tabla 3-1:</b>	Características de los equipos comerciales de análisis vibracional .....	23
<b>Tabla 1-2:</b>	Características técnicas del motor eléctrico.....	31
<b>Tabla 2-2:</b>	Características chumacera P204 y rodamiento U204 .....	32
<b>Tabla 3-2:</b>	Características acople flexible de mordaza L100 .....	32
<b>Tabla 4-2:</b>	Características técnicas PLC RIEVTECH EXM-12DC-DA-RT-GWIFI.....	34
<b>Tabla 5-2:</b>	Características técnicas del acelerómetro ADXL335 .....	35
<b>Tabla 6-2:</b>	Características técnicas de las tarjetas de adquisición de datos.....	35
<b>Tabla 7-2:</b>	Asignación de entradas y salidas .....	43
<b>Tabla 8-2:</b>	Direccionamiento MODBUS .....	45
<b>Tabla 1-3:</b>	Vibración global de la aceleración en el punto 1.....	54
<b>Tabla 2-3:</b>	Vibración global de la velocidad en el punto 1 .....	55
<b>Tabla 3-3:</b>	Vibración global del desplazamiento en el punto 1 .....	56
<b>Tabla 4-3:</b>	Vibración global de la aceleración en el punto 2.....	57
<b>Tabla 5-3:</b>	Vibración global de la velocidad en el punto 2 .....	58
<b>Tabla 6-3:</b>	Vibración global del desplazamiento en el punto 2.....	59
<b>Tabla 7-3:</b>	Amplitudes y frecuencias de los espectros en aceleración en el punto 1 .....	60
<b>Tabla 8-3:</b>	Amplitudes y frecuencias de los espectros en velocidad en el punto 1 .....	61
<b>Tabla 9-3:</b>	Amplitudes y frecuencias de los espectros en desplazamiento en el punto 1.....	62
<b>Tabla 10-3:</b>	Amplitudes y frecuencias de los espectros en aceleración en el punto 2 .....	63
<b>Tabla 11-3:</b>	Amplitudes y frecuencias de los espectros en velocidad en el punto 2 .....	64
<b>Tabla 12-3:</b>	Amplitudes y frecuencias de los espectros en desplazamiento en el punto 2.....	65
<b>Tabla 13-3:</b>	Prueba t- Student Espectro de velocidad Punto 1 .....	67
<b>Tabla 14-3:</b>	Prueba t- Student Espectro de velocidad Punto 2.....	68
<b>Tabla 15-3:</b>	Reporte de análisis de vibraciones.....	71
<b>Tabla 16-3:</b>	Consumo de potencia del sistema.....	73
<b>Tabla 17-3:</b>	Costo del Sistema de Análisis Vibracional.....	74

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-1:</b>	Elementos de una onda .....	8
<b>Figura 2-1:</b>	Presentación de fases .....	9
<b>Figura 3-1:</b>	Movimiento Armónico Sencillo.....	9
<b>Figura 4-1:</b>	Suma de vibraciones simple en el dominio del tiempo.....	10
<b>Figura 5-1:</b>	Señal en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia.....	11
<b>Figura 6-1:</b>	Sentidos de medición .....	11
<b>Figura 7-1:</b>	Desequilibrio estático.....	13
<b>Figura 8-1:</b>	Desequilibrio dinámico .....	13
<b>Figura 9-1:</b>	Rotor colgante .....	13
<b>Figura 10-1:</b>	Desalineación angular .....	14
<b>Figura 11-1:</b>	Desalineación paralela .....	14
<b>Figura 12-1:</b>	Desalineación entre chumaceras .....	15
<b>Figura 13-1:</b>	Soltura estructural .....	15
<b>Figura 14-1:</b>	Acelerómetro mecánico .....	17
<b>Figura 15-1:</b>	Acelerómetro capacitivo .....	18
<b>Figura 16-1:</b>	Acelerómetro piezoeléctrico .....	18
<b>Figura 17-1:</b>	Acelerómetro MEMS.....	18
<b>Figura 18-1:</b>	Partes de un motor eléctrico.....	21
<b>Figura 19-1:</b>	VIBRAcheck 200.....	24
<b>Figura 20-1:</b>	Acelerómetro de referencia estándar.....	26
<b>Figura 21-1:</b>	Sistema típico de calibración consecutiva .....	26
<b>Figura 22-1:</b>	Respuesta típica del acelerómetro de prueba .....	27
<b>Figura 1-2:</b>	Etapas del sistema .....	28
<b>Figura 2-2:</b>	Topología del sistema automatizado.....	29
<b>Figura 3-2:</b>	Motor eléctrico 110V .....	31
<b>Figura 4-2:</b>	Chumacera P204 y U204 .....	31
<b>Figura 5-2:</b>	Acople Lovejoy L-100.....	32
<b>Figura 6-2:</b>	Polea.....	33
<b>Figura 7-2:</b>	RIEVTECH EXM-12DC-DA-RT-GWIFI.....	33
<b>Figura 8-2:</b>	Acelerómetro ADXL335 .....	34
<b>Figura 9-2:</b>	NI DAQ USB 6009.....	36
<b>Figura 10-2:</b>	Base principal del banco de pruebas .....	36
<b>Figura 11-2:</b>	Montaje del motor, acople y eje de acero .....	37
<b>Figura 12-2:</b>	Montaje de todas las partes mecánicas .....	37

<b>Figura 13-2:</b>	Distribución de los componentes eléctricos/electrónicos .....	38
<b>Figura 14-2:</b>	Esquema eléctrico del banco de pruebas.....	38
<b>Figura 15-2:</b>	Conexiones entre acelerómetro y DAQ USB-6009 .....	39
<b>Figura 16-2:</b>	Visualización virtual del banco de pruebas.....	39
<b>Figura 17-2:</b>	Montaje banco de pruebas del sistema de análisis vibracional .....	40
<b>Figura 18-2:</b>	Configuración del bloque DAQ Assistant para el acelerómetro .....	40
<b>Figura 19-2:</b>	Estructura del acelerómetro .....	41
<b>Figura 20-2:</b>	Acondicionamiento de señal del acelerómetro .....	42
<b>Figura 21-2:</b>	Diagrama de flujo que representa la programación del PLC RIEVTECH .....	43
<b>Figura 22-2:</b>	Directorio telefónico .....	44
<b>Figura 23-2:</b>	Configuración de un nuevo proyecto .....	45
<b>Figura 24-2:</b>	Diagrama de flujo para el desarrollo de la interfaz PVA .....	46
<b>Figura 25-2:</b>	Diagrama de flujo para la exportación de datos.....	47
<b>Figura 26-2:</b>	Diagrama de flujo para la visualización de la documentación.....	48
<b>Figura 27-2:</b>	Diagrama de flujo para la evaluación de severidad norma ISO 2372 .....	49
<b>Figura 28-2:</b>	Interfaz de la pantalla principal.....	49
<b>Figura 29-2:</b>	Interfaz de la señal de aceleración .....	50
<b>Figura 30-2:</b>	Interfaz de la señal de velocidad.....	50
<b>Figura 31-2:</b>	Interfaz de la señal de desplazamiento.....	51
<b>Figura 32-2:</b>	Interfaz para la visualización de la documentación .....	51
<b>Figura 1-3:</b>	Puntos de medición del banco de pruebas .....	53
<b>Figura 2-3:</b>	Forma de onda de la aceleración del punto 1 PVA.....	54
<b>Figura 3-3:</b>	Forma de onda de la aceleración en el punto 1 VIBRAcheck .....	54
<b>Figura 4-3:</b>	Forma de onda de la velocidad en el punto 1 PVA.....	55
<b>Figura 5-3:</b>	Forma de onda de la velocidad en el punto 1 VIBRAcheck .....	55
<b>Figura 6-3:</b>	Forma de onda del desplazamiento en el punto 1 PVA .....	56
<b>Figura 7-3:</b>	Forma de onda del desplazamiento en el punto 1 VIBRAcheck .....	56
<b>Figura 8-3:</b>	Forma de onda de la aceleración en el punto 2 PVA .....	57
<b>Figura 9-3:</b>	Forma de onda de la aceleración en el punto 2 VIBRAcheck .....	57
<b>Figura 10-3:</b>	Forma de onda de la velocidad en el punto 2 PVA.....	58
<b>Figura 11-3:</b>	Forma de onda de la velocidad en el punto 2 VIBRAcheck .....	58
<b>Figura 12-3:</b>	Forma de onda del desplazamiento en el punto 2 PVA .....	59
<b>Figura 13-3:</b>	Forma de onda del desplazamiento en el punto 2 VIBRAcheck .....	59
<b>Figura 14-3:</b>	Espectro de la aceleración en el punto 1 PVA.....	60
<b>Figura 15-3:</b>	Espectro de la aceleración en el punto 1 VIBRAcheck .....	60
<b>Figura 16-3:</b>	Espectro de la velocidad en el punto 1 PVA.....	61
<b>Figura 17-3:</b>	Espectro de la velocidad en el punto 1 VIBRAcheck .....	61

<b>Figura 18-3:</b>	Espectro de desplazamiento en el punto 1 PVA .....	62
<b>Figura 19-3:</b>	Espectro de desplazamiento en el punto 1 VIBRAcheck.....	62
<b>Figura 20-3:</b>	Espectro de la aceleración en el punto 2 PVA .....	63
<b>Figura 21-3:</b>	Espectro de la aceleración en el punto 2 VIBRAcheck .....	63
<b>Figura 22-3:</b>	Espectro de la velocidad en el punto 2 PVA.....	64
<b>Figura 23-3:</b>	Espectro de la velocidad en el punto 2 VIBRAcheck .....	64
<b>Figura 24-3:</b>	Espectro del desplazamiento en el punto 2 PVA .....	65
<b>Figura 25-3:</b>	Espectro de desplazamiento en el punto 2 VIBRAcheck.....	65
<b>Figura 26-3:</b>	Prueba de normalidad PVA punto 1 .....	66
<b>Figura 27-3:</b>	Prueba de normalidad VIBRAcheck punto 1.....	66
<b>Figura 28-3:</b>	Prueba de normalidad PVA punto 2 .....	67
<b>Figura 29-3:</b>	Prueba de normalidad VIBRAcheck punto 2.....	67
<b>Figura 30-3:</b>	Evaluación de severidad Zona A .....	69
<b>Figura 31-3:</b>	Mensaje de alerta Zona A .....	69
<b>Figura 32-3:</b>	Evaluación de severidad Zona D .....	69
<b>Figura 33-3:</b>	Mensaje de alerta Zona D .....	70

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación 1-1:</b>	Valor RMS de la onda .....	7
<b>Ecuación 2-1:</b>	Valor RMS a partir de valor pico de la onda .....	8
<b>Ecuación 3-1:</b>	Valor RMS a partir de valor pico de la onda .....	26
<b>Ecuación 1-2:</b>	Ecuación característica del acelerómetro.....	42
<b>Ecuación 1-3:</b>	Calculo de potencia.....	73

## ÍNDICE DE ANEXOS

**Anexo A:** Cartas de Charlotte

**Anexo B:** Norma ISO 2372

**Anexo C:** Datos técnicos VIBRAcheck 200

**Anexo D:** Datos técnicos PLC RIEVTECH EXM-12DC-DA-RT-GWIFI

**Anexo E:** Datos técnicos acelerómetro ADXL355

**Anexo F:** Datos técnicos NI DAQ USB 6009

**Anexo G:** Programación del PLC RIEVTECH

**Anexo H:** Configuración MODBUS TCP

**Anexo I:** Programación de la interfaz en LABVIEW

**Anexo J:** Guía de usuario del sistema Predictive Vibration Analysis

**Anexo K:** Montaje de los elementos mecánicos del banco de pruebas

**Anexo L:** Montaje y conexión de los elementos eléctricos/electrónicos del banco de pruebas

**Anexo M:** Pruebas realizadas con el sistema Predictive Vibration Analysis

**Anexo N:** Pruebas realizadas con el equipo VIBRAcheck 200

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

<b>CPM:</b>	Ciclos por minuto
<b>DAQ:</b>	Adquisición de datos
<b>FFT:</b>	Transformada rápida de Fourier
<b>GSM:</b>	Sistema global para comunicaciones móviles
<b>HMI:</b>	Interfaz humano máquina
<b>HZ:</b>	Hercio
<b>IP:</b>	Protocolo de internet
<b>ISO:</b>	Organización Internacional de Estandarización
<b>KS:</b>	Kilo muestras
<b>MEMS:</b>	Sistema Micro Electromecánico
<b>MV:</b>	Milivoltios
<b>NI:</b>	National Instrument
<b>OPC:</b>	Control de Procesos OLE
<b>PLC:</b>	Controlador Lógico Programable
<b>PVA:</b>	Análisis Vibracional Predictivo
<b>RMS:</b>	Raíz cuadrada media
<b>RPM:</b>	Revolución por minuto
<b>RPS:</b>	Revolución por segundo
<b>SMS:</b>	Servicio de mensajes cortos
<b>SIM:</b>	Modulo de identificación de abonado
<b>TCP:</b>	Protocolo de control de transmisión
<b>USB:</b>	Bus serial universal
<b>VI:</b>	Instrumento Virtual
<b>WI-FI:</b>	Fidelidad Inalámbrica

## RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo, implementar un sistema automatizado de análisis vibracional como herramienta de diagnóstico para el mantenimiento predictivo en motores eléctricos a través de procesamiento de señales mediante el uso de un banco de pruebas. Este sistema permite diagnosticar las principales fallas generadas por vibraciones en motores eléctricos. Las vibraciones son adquiridas usando un acelerómetro triaxial instalado en el motor y una tarjeta de adquisición de datos (NI-DAQ USB 6009). Los datos adquiridos son enviados a un ordenador, y mediante el software LabVIEW se realiza el procesamiento de la señal con el fin de obtener la forma de onda en el tiempo, acondicionando y transformando la señal en un espectro de frecuencia utilizando la transformada rápida de Fourier (FFT). Al proyecto se añade un sistema global para comunicaciones móviles (GSM) utilizando un controlador lógico programable (PLC), permitiendo al usuario obtener mensajes de monitoreo acerca del estado del motor y sus niveles de vibración sin necesidad de verificar continuamente dichos valores en la interfaz humano-máquina (HMI). Los resultados obtenidos fueron comparados a través de un análisis visual y estadístico con el equipo VIBRAcheck 200. A partir de los valores globales de vibración se obtuvo errores RMS relativos menores al 2%, mientras que respecto a los valores de los componentes frecuenciales se encontró un valor de media similar entre los dos equipos. Este análisis fue utilizado para elaborar un plan de mantenimiento predictivo basado en el diagnóstico de los espectros de acuerdo con lo establecido en las cartas de Charlotte y en base a los niveles de vibración se establece la severidad en base a la norma ISO 2372. Se recomienda el uso del sistema implementado como alternativa en los procesos de diagnóstico y elaboración de planes de mantenimiento en motores eléctricos.

**PALABRAS CLAVE:** <TELECOMUNICACIONES>, <ANÁLISIS DE SEÑALES>, <ANÁLISIS VIBRACIONAL>, <MANTENIMIENTO PREDICTIVO>, <DIAGNÓSTICO DE FALLAS>, <COMUNICACIONES MÓVILES>, <TRANSMISIÓN DE DATOS>.

## **ABSTRACT**

The objective of this work was to implement an automated system of vibrational analysis as a diagnostic tool for predictive maintenance in electric motors through signal processing using a test bench. This system allows to diagnose the main failures caused by vibrations in electric motors. The vibrations are acquired by using a triaxial accelerometer installed in the motor and a data acquisition card (NI-DAQ USB 6009). The acquired data is sent to a computer, and through the LabVIEW software the signal processing is performed in order to obtain the waveform over time, conditioning and transforming the signal into a frequency spectrum using the Fast Fourier Transform (FFT). To this is added a Global System for Mobile Telecommunications (GSM) using a programmable logic controller (PLC), allowing the user to be informed about the state of motor and its vibration levels without the need of continuously verifying the levels on the Human-Machine Interface (HMI). The obtained results were compared through a visual and statistical analysis with the VIBRAcheck 200 equipment. From the vibration global values RMS errors less than 2% were obtained, while with respect to the values of the frequency components a similar average value was obtained between the two equipment's. This analysis was used to carry out a predictive maintenance plan based, which consists of the spectra diagnosis according to what is established in the Charlotte charts and based on the vibration levels, the severity is established based on the ISO 2372 standard. The use of the implemented system as an alternative to the diagnostic processes and development of electrical motor maintenance plan is recommended.

**KEYWORDS:** <TELECOMMUNICATIONS> <SIGNAL ANALYSIS> <VIBRATIONAL ANALYSIS> <FREQUENCY> <SPECTRUMS> <PREDICTIVE MAINTENANCE> <GSM> <LABVIEW (SOFTWARE)>.

## INTRODUCCIÓN

Como todo proceso de Ingeniería, el mantenimiento fue evolucionando a través de la historia cronológicamente y se ha caracterizado en distintas etapas por los procedimientos y las metodologías establecidas. El mantenimiento es el conjunto de acciones de una empresa u organización que buscan preservar los equipos y máquinas consiguiendo que su disponibilidad, desempeño y seguridad sean elevadas al máximo posible. (Espinoza, 2014) El principio del mantenimiento predictivo es que la mayoría de las partes de la máquina dan algún tipo de aviso antes de fallar, por lo que se determina a través de mediciones periódicas en tiempo real, conociendo el estado o condición del equipo.

La medición de vibración y su análisis son las bases del Mantenimiento Predictivo, que forma un fuerte contraste con la práctica de mantenimiento correctivo. Varios estudios, como el que llevó a cabo el Instituto de la Investigación de la Energía Eléctrica (EPRI) demostraron que, en promedio, la industria gasta 17 USD por año por caballo de fuerza, en el mantenimiento de la maquinaria, si se practica, "funcionar hasta fallar". Técnicas de mantenimiento predictivas aplicadas correctamente redujeron esta cantidad hasta 9\$ por caballo de fuerza. (White,2010) Además un estudio realizado en Costa Rica demostró que una cantidad importante de motores (17%) son llevados al taller sin tener una falla que amerite su intervención, lo que ocasiona los siguientes gastos: paro en la producción y comercialización del producto, remuneración del personal sin que realicen su respectivo trabajo, (Guerrero, Gómez, 2011) por esta razón hoy en día, el análisis vibracional en motores eléctricos tiene como objetivo, reducir los costos de mantenimientos innecesarios, paros ineficientes en la producción, predecir a tiempo las fallas que pueden presentarse y comunicar al técnico encargado de todo el funcionamiento del motor.

Se han revisado diferentes investigaciones con distintos sistemas propuestos, con toda esa información se procede a comparar los equipos utilizados y las normas que siguen para realizar un correcto mantenimiento predictivo, a través, del análisis vibracional. Este análisis es utilizado para el diagnóstico de los espectros y de la severidad de la vibración basado en la norma ISO 2372. Muchos de los sistemas implementados cumplen con los requerimientos que se planteaban, aunque utilizaban equipos de medición de vibración posicionados en el mercado, entre los cuales se encuentran: VIBRAcheck 200 el cual visualiza unidades, espectros y formas de onda, VSE002 realiza un monitoreo continuo pero solo funciona con sensores propios de la marca y A4900 Vibrio M tiene un tiempo de trabajo de 8 horas y sólo permite visualizar los niveles de vibración, estos equipos poseen un elevado costo.

En el sector industrial ecuatoriano, el 50% de las empresas no realizan un mantenimiento predictivo (Aldaz, 2015), debido a que la mayoría de los equipos comerciales para medir vibraciones tienen un alto costo, no realizan un monitoreo constante y en consecuencia ocasiona que estos datos no estén disponibles para el personal, esto provoca a que se realice el mantenimiento correctivo, cada vez que aparezca una falla, por eso se implementa un sistema de análisis vibracional para mantenimiento predictivo en motores eléctricos, al cual se le añade un sistema de comunicación GSM permitiendo a los encargados tener un control del estado del nivel de vibración del motor sin estar verificando continuamente los niveles en el HMI. El sistema se desarrolla en el software LabVIEW con el nombre de Predictive Vibration Analysis (PVA), capaz de representar la vibración medida en formas de ondas y espectros en las unidades de aceleración, velocidad y desplazamiento, las cuales serán comparadas a través de un análisis visual y estadístico con el equipo VIBRAcheck 200, con el fin de validar el sistema.

## **FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

¿Cómo desarrollar un sistema automatizado de análisis vibracional para el mantenimiento predictivo en motores eléctricos?

## **SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA**

¿Existen equipos en la actualidad que cumplan con las normas de análisis vibracional para detectar fallos en motores eléctricos?

¿Qué software y hardware son necesarios para cumplir con los requerimientos y parámetros de diseño del sistema automatizado de análisis vibracional para el mantenimiento predictivo en motores eléctricos?

¿El sistema implementado será capaz de realizar un correcto análisis vibracional?

¿Es posible desarrollar un plan de mantenimiento predictivo para mejorar la disponibilidad de motores eléctricos?

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Implementar un sistema automatizado de análisis vibracional para el mantenimiento predictivo en Motores Eléctricos a través de procesamiento de señales.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar que equipos en la actualidad cumplen con las normas de análisis vibracional para detectar fallos en motores eléctricos.
- Implementar el sistema utilizando herramientas de software y componentes hardware que cumplan con los requerimientos y parámetros de diseño del sistema automatizado de análisis vibracional para el mantenimiento predictivo en motores eléctricos.
- Evaluar si el sistema implementado cumple con la norma establecida para su correcto análisis vibracional.
- Efectuar un plan de mantenimiento predictivo para mejorar la disponibilidad de motores eléctricos.

# CAPÍTULO I

## 1 MARCO TEÓRICO

### 1.1 Mantenimiento

Se define a esta disciplina como el mecanismo de técnicas la cual tiene la finalidad de conservar el adecuado funcionamiento de máquinas, equipos e instalaciones durante el mayor tiempo posible y con el máximo rendimiento, mediante: reparación, pruebas, análisis, adecuamiento, calibración y reemplazo. (Maigua, Rodríguez, 2018)

#### *1.1.1 Tipos de Mantenimiento*

En la industria el mantenimiento ha evolucionado gracias a los desarrollos tecnológicos de nuevos equipos de control y medida. Realizar un buen mantenimiento a motores eléctricos proporciona divisar y planear factibles soluciones para alargar la vida útil de los mismos, anticipando futuros fallos que se puedan presentar en la máquina.

De manera sencilla se puede resumir los diferentes tipos de mantenimiento realizados en este análisis:

- Mantenimiento Correctivo
- Mantenimiento Preventivo o planificado
- Mantenimiento Predictivo o por Condición

#### *1.1.1.1 Mantenimiento Correctivo*

Se lo conoce también como mantenimiento de funcionamiento hasta fallar, en principio quedaba relegado a intervenciones después del reconocimiento de una avería, lo que conllevaba que los costos de este mantenimiento sean excesivamente altos, debido a mano de obra, piezas de repuestos, así como los costes derivados de las paradas de producción. (Manual Análisis de vibraciones, 2017)

### *1.1.1.2 Mantenimiento Preventivo*

Debido a los altos costos presentados por el mantenimiento correctivo conllevaron a los técnicos a programar revisiones periódicas con el objetivo de anticipar fallas y desgastes de las máquinas para mantenerlas en óptimas condiciones y así reducir los paros innecesarios de la producción, dando por resultado el mantenimiento preventivo. (Maigua, Rodríguez, 2018)

En el mantenimiento preventivo se realizan otras tareas como el cambio de aceite y filtros, limpieza e inspección periódica. Este mantenimiento puede ser programado en días de calendario o bien por las horas de operación de cada máquina. (White, 2010)

### *1.1.1.3 Mantenimiento Predictivo*

Se implementó un nuevo concepto de mantenimiento basado en la condición o estado de la máquina, este tipo de proceso se conoce como mantenimiento predictivo, consiste en anticipar la avería por medio de conocimiento de cómo se comporta la máquina y como debería hacerlo, sabiendo de este modo cual elemento puede fallar y cuando. Con este mantenimiento se puede decidir en cual momento se puede programar una intervención a la máquina sin afectar el proceso productivo, de este modo se optimizan costes de producción, mano de obra y repuestos, evitando grandes y costosas averías acelerando las intervenciones. (Espin,2011)

La información más importante proporcionada por este tipo de seguimiento de los equipos es la tendencia de ciertas variables o parámetros relacionados con la condición de la máquina, como por ejemplo la vibración, temperatura, aceites, aislamientos, etc., lo cual permitirá calcular o prever, con cierto margen de error, cuando un equipo fallará; por ese motivo se denominan técnicas predictivas.

#### **- Ventajas del Mantenimiento Predictivo**

Las acciones del mantenimiento predictivo atraviesan por inconvenientes iniciales de elevados costos de inversión en tecnología y capacitación del personal, pero que tendrá una rentabilidad medio y largo plazo. Pero las ventajas son evidentes:

- La principal ventaja radica en la velocidad de la detección de la falla, en forma anticipada y temprana al hecho
- Reduce el tiempo de parada al conocer exactamente cual ítem falla.
- Permite seguir la evolución de un defecto en el tiempo.

- Optimiza la gestión del personal de mantenimiento.
- Verifica la condición de estado y monitoreo en tiempo real de un equipo.
- Maneja y analiza un registro de información histórica vital.
- Define los límites de tendencia relativos a los tiempos de falla o de aparición de condiciones no estándares.
- Posibilita la toma de decisiones sobre la parada de equipos críticos.
- Reduce el inventario de repuestos y los costos de almacenaje.
- Aumenta la disponibilidad de los equipos
- Provee el conocimiento del histórico de actualizaciones, para ser utilizados por el mantenimiento correctivo.
- Facilita el análisis de averías.
- Aplica el análisis estadístico en los equipos.

- **Etapas del Mantenimiento Predictivo**

Contempla de modo eficaz tres etapas principales:

- **Detección:** Se basa en reconocer el problema, teniendo en cuenta las prioridades de la empresa, y seleccionar cuáles son las máquinas más propensas a sufrir un daño.
- **Análisis:** Cuando el problema ha sido detectado, es necesario proceder a determinar la causa de este, es decir, identificar el componente o componentes de las máquinas, los cuales han sido los causantes del incremento en los niveles de un estudio, con respecto a las referencias reflejadas por una condición mecánica normal.
- **Corrección:** Una vez culminado los anteriores pasos, se debe organizar y ejecutar de modo eficiente las tareas de eliminación del problema y de su propia causa.

## 1.2 Principios del análisis vibracional

Toda máquina rotativa presenta una vibración única, lo cual le permite diferenciarse de las otras, esto se conoce como forma de vibración. Esta señal nace del propio diseño, fabricación, uso y deterioro de cada uno de sus componentes.

Considerar las vibraciones de cada máquina es uno de los parámetros más importantes, especialmente cuando se realiza un plan de mantenimiento predictivo, lo cual permite aumentar

la vida útil de las maquinarias, si el técnico encargado de los equipos industriales es capacitado en comprender este tipo de vibraciones, la empresa ahorrará costos de paro de producción, operación y mantenimiento. (Angulo, Salazar, 2013)

### **1.2.1 Definición de vibración**

La vibración es el movimiento de impulso de una máquina o de alguno de sus componentes de su lugar de apoyo original. De forma comprensible, se puede considerar como la oscilación o el movimiento iterativo de un objeto cerca de una posición de equilibrio. (White, 2010)

Uno de los principales orígenes de tener excesivas vibraciones reside en inconvenientes mecánicos como son los principales: desalineación en acoplamientos, desequilibrio en partes rotativas, estos dos problemas generan daños en rodamientos y engranajes.

### **1.2.2 Elementos de una vibración**

La vibración tiene tres parámetros fundamentales los cuales se pueden obtener midiendo con diferentes equipos de análisis de vibraciones disponibles en el mercado, estos elementos son: amplitud, frecuencia y fase.

#### **1.2.2.1 Amplitud**

Es la magnitud de la vibración o la cantidad de aceleración, velocidad o desplazamiento de la vibración, medida desde su posición neutral, se puede medir en valores de pico positivo, pico-pico y RMS (ver figura 1-1). El último valor se lo conoce también como valor efectivo, indica la raíz cuadrada del promedio de los cuadrados de los valores de la señal, de forma discreta se lo puede hallar de la siguiente manera:

**Ecuación 1-1:** Valor RMS de la onda

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 + \dots + v_N^2}{N}}$$

En donde:

**V<sub>RMS</sub>:** Valor RMS de una señal

**V:** Valores pico

**N:** Número de muestras

En el caso particular de una vibración armónica se obtiene:

**Ecuación 2-1:** Valor RMS a partir de valor pico de la onda

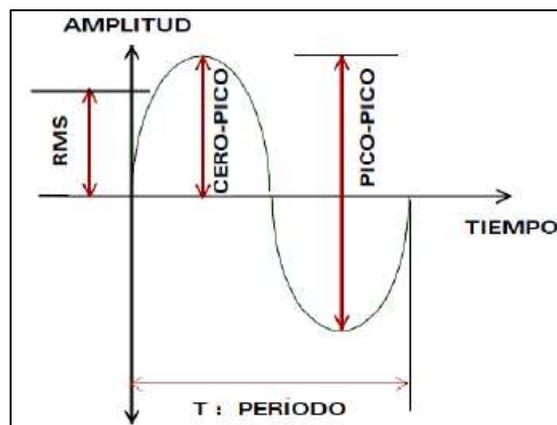
$$V_{RMS} = 0.707 \times V_{PICO}$$

En donde:

**V<sub>PICO</sub>:** Valor pico positivo de la onda

### 1.2.2.2 Frecuencia

La frecuencia se expresa en unidad de ciclo por minuto (CPM) o en ciclos por segundo (CPS), que ahora se llaman Hertz (donde 1 Hertz es igual a 60 CPM). Se puede calcular midiendo el periodo de tiempo (T) de un ciclo e invertirlo. (ver figura 1-1).

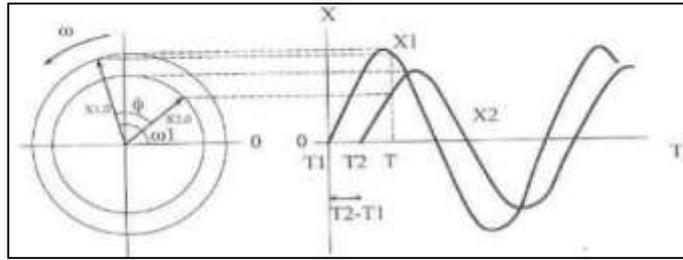


**Figura 1-1:** Elementos de una onda

Fuente: (A-MAQ,2005)

### 1.2.2.3 Fase

Es el desplazamiento relativo de una parte vibratoria a un punto de referencia fijo en otra parte vibratoria. Es decir, es la diferencia de tiempo entre dos señales sinusoidales (ver figura 2-1). Generalmente se mide en ángulos, grados o radianes. (White, 2010)



**Figura 2-1:** Presentación de fases

Fuente: (Montero, Narváez, 2015)

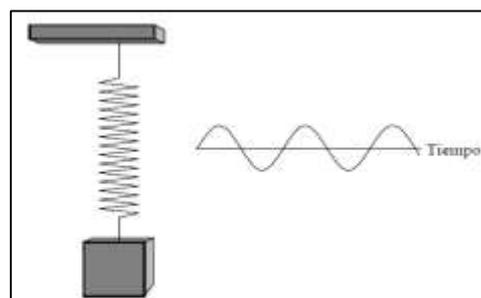
### 1.2.3 Análisis Vibracional

Esta técnica del mantenimiento predictivo se basa en la detección de fallos en equipos rotativos principalmente, a través del estudio de los niveles de vibración. El objetivo final es obtener la representación del espectro de las vibraciones de un equipo en funcionamiento para su posterior análisis.

Para aplicarla de forma efectiva y obtener conclusiones representativas y válidas, es necesario conocer determinados datos de la máquina como son la velocidad de giro, el tipo de cojinetes, de correas, número de alabes o de palas, etc., y elegir los puntos adecuados de medida. También es necesario seleccionar el analizador más adecuado a los equipos existentes en la planta.

#### 1.2.3.1 Vibración Simple

La característica primordial de las señales de vibración en el dominio del tiempo son las ondas sinusoidales. Son las oscilaciones más simples y puras. Una oscilación se puede representar con un sistema resorte-masa, si se desplaza la masa hasta una determinada distancia del punto neutro, y después se suelta, el resorte lo regresará al equilibrio, este fenómeno provocará cambios de energías cinética que adquiere la masa y energía potencial que adquiere el resorte. En la figura 3-1, se puede evidenciar el sistema descrito. (A-MAQ, 2008)



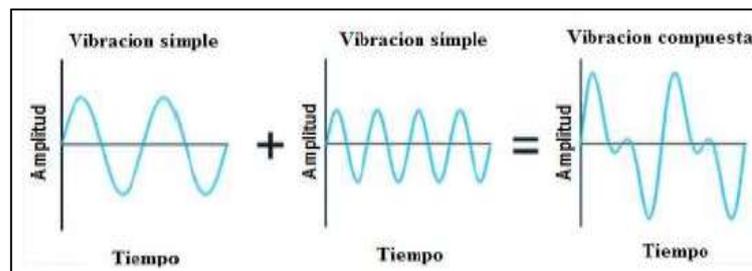
**Figura 3-1:** Movimiento Armónico Sencillo

Fuente: (White, 2010)

Este sistema ideal casi nunca se encontrará en una máquina real, ya que cualquier sistema tendrá cierta fricción y eso hace que la amplitud de la vibración sea cambiante.

### 1.2.3.2 Vibración compuesta

Está formada por la suma de diferentes vibraciones simples. Todas las máquinas están formadas por vibraciones compuestas, producto de vibraciones simples provenientes de sus componentes internos rotatorios. Conociendo esto, se describe que la forma de onda de vibración de una máquina no es una señal sinusoidal pura, sino tiende a ser más compleja. Como se observa en la figura 4-1, dos señales de vibración diferente se suman para dar origen a una compuesta. Para ondas de este tipo, tienen un grado alto de complejidad obtener sus respectivos valores en amplitud y tiempo, por tal motivo el análisis se deberá realizar en el dominio de la frecuencia aplicando la transformada rápida de Fourier. (Bohórquez, González, 2013)



**Figura 4-1:** Suma de vibraciones simple en el dominio del tiempo

**Fuente:** (Manual de Vibraciones, 2018)

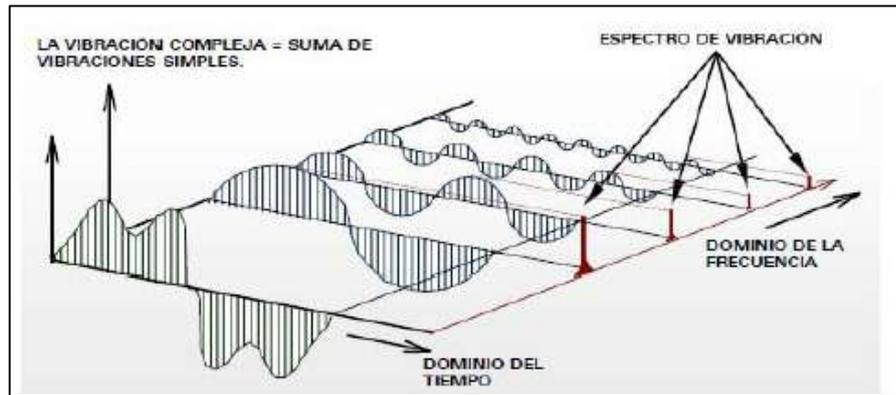
### 1.2.3.3 La transformada rápida de Fourier (FFT)

Las vibraciones pueden ser estudiadas y comprendidas de mejor manera en el dominio de la frecuencia.

Las vibraciones en el dominio del tiempo son señales que provienen de la máquina. En estas señales se encuentra toda la información acerca del comportamiento de cada componente de la máquina. Existe un inconveniente cuando se va a realizar un diagnóstico, estas señales están saturadas de mucha información compleja, derivada de las señales de cada elemento que conforman la máquina. Por esta razón las vibraciones pueden ser estudiadas y comprendidas de mejor manera en el dominio de la frecuencia aplicando la transformada rápida de Fourier. Esta es la gráfica de Amplitud vs. Frecuencia y es conocida con el nombre de espectro. Entonces un analizador de espectros adquiere una señal desde una máquina, luego calcula todas las series de señales sinusoidales de la señal compleja y por último las muestra en forma individual en el eje

de las abscisas, la cual está representada por la frecuencia. En la figura 5-1 se puede observar una figura de tres dimensiones con una señal de onda compuesta y sus respectivas representaciones en el dominio de la frecuencia. (Manual de análisis de vibraciones, 2018)

A dicha señal se le calculan todas las series de señales sinusoidales en el dominio del tiempo (vistas en azul) y por último se muestra cada una en el dominio de la frecuencia (vistas en rojo).

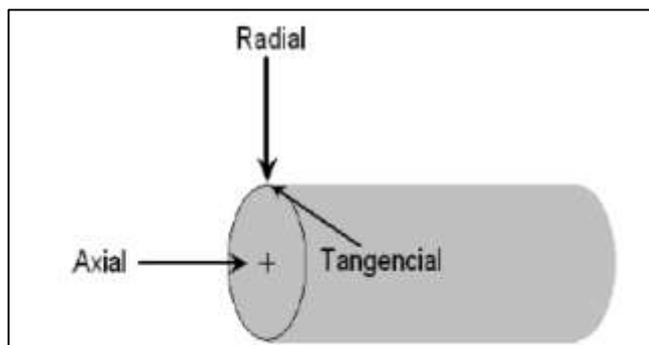


**Figura 5-1:** Señal en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia

Fuente: (A-MAQ, 2005)

#### 1.2.3.4 Sentidos principales de medición

Para realizar una medición confiable es necesario al menos un punto en la máquina (descansos) para saber si existe una vibración considerable. Existen tres tipos de direcciones que se pueden aplicar para realizar este tipo de mediciones como se puede observar en la figura 6-1.



**Figura 6-1:** Sentidos de medición

Fuente: (Jiménez, 2013)

- **Axial:** Es la dirección paralela al punto de referencia, se coloca en la misma dirección del eje, en condiciones normales presenta valores menores a los radiales, debido a que las fuerzas son

perpendiculares al eje. Por esta razón medir en este sentido se puede observar problemas de vibración originados por desalineación.

- **Radial:** Es la dirección que se coloca normalmente el transductor, es decir hasta el centro del punto de referencia, los valores de medición son diferentes debido a la diferencia de rigidez y a la acción de la gravedad.
- **Tangencial:** Forma un ángulo de 90 grados con la dirección radial, tangente al punto de referencia, en este sentido de medición generalmente se puede observar el balanceo de la máquina.

#### ***1.2.4 Espectros Utilizados para el diagnóstico de la máquina***

Un espectro de vibración muestra o grafica la amplitud versus la frecuencia. Como ya se mencionó visualizar y usar el dominio del tiempo es un método muy preciso para ver el movimiento real o total de la máquina, pero al momento de realizar un análisis de la onda y de la amplitud de esta se convierte en algo muy complejo. Por esta razón se utiliza el análisis espectral debido a que la frecuencia ayuda a determinar el origen de la vibración y la amplitud permite conocer la severidad del problema. (Mendoza, Miranda, 2014) De una forma breve se detallará los problemas más comunes con su respectivo espectro característico que se presentan en las máquinas de acuerdo con la carta de Charlotte, la cual es una tabla diseñada por una asociación de expertos en el tema de vibraciones (ver Anexo A).

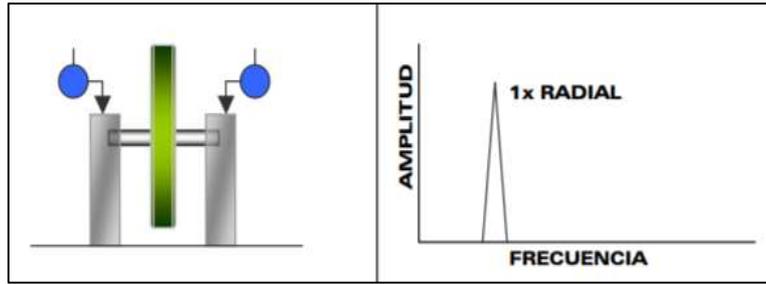
##### ***1.2.4.1 Desequilibrio***

También es conocido como desbalance, se origina por la mala distribución de las masas sobre el centro de rotación de la máquina.

Es uno de los problemas más comunes de vibraciones en maquinaria. (Saltos, Yanchiliquín, 2013)

Existen dos tipos que son los siguientes:

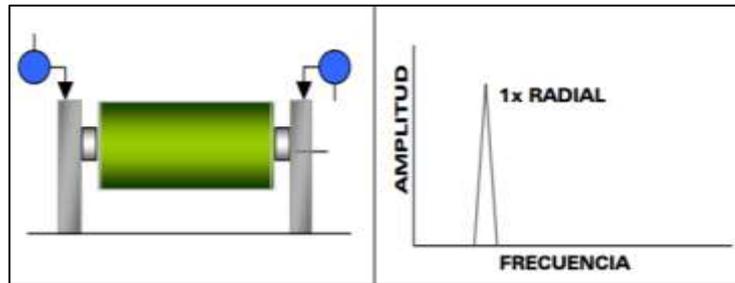
- a) **Desequilibrio estático:** Originado principalmente por desgaste radial superficial no uniforme en las partes del rotor en los cuales su largo es insignificante en comparación con su diámetro. En el espectro como se puede observar en la figura 7-1, tiene una vibración dominante con una frecuencia igual a 1 X RPS del rotor.



**Figura 7-1:** Desequilibrio estático

Fuente: (A-MAQ, 2005)

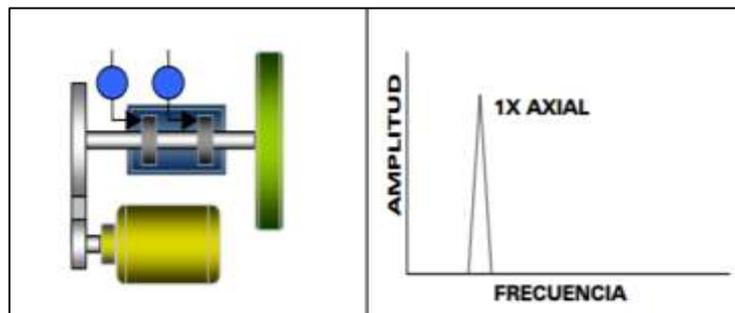
- b) **Desequilibrio dinámico:** El desbalanceo dinámico se produce en rotores largos y medianos. Se origina principalmente por desgastes radiales y axiales simultáneos en la superficie del rotor. El espectro se puede observar en la figura 8-1, corresponde a una vibración dominante y vaivén simultaneo con frecuencia igual a 1 X RPS del rotor.



**Figura 8-1:** Desequilibrio dinámico

Fuente: (A-MAQ, 2005)

- c) **Rotor Colgante:** Se produce en rotores ubicados en el extremo del eje. Es originado por desgaste de la superficie del rotor y doblamiento del eje. El espectro se puede observar en la figura 9-1, tiene una vibración dominante a 1X RPS del rotor, muy evidente en la dirección radial y axial.



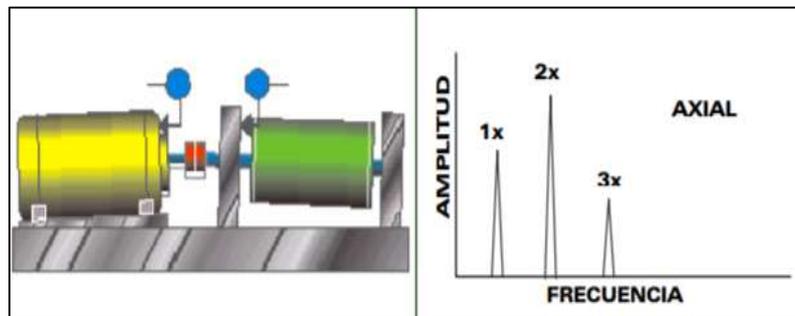
**Figura 9-1:** Rotor colgante

Fuente: (A-MAQ, 2005)

### 1.2.4.2 Desalineación

Se origina por la no concurrencia de los centros de dos elementos que se acoplan. Se presenta con mayor frecuencia en los acoples de máquinas, es decir la unidad conductora y la conducida. (Saltos, Yanchiliquín, 2013) Este problema representa el 50% de los inconvenientes de vibraciones que se presentan en la industria. Se puede encontrar los siguientes tipos:

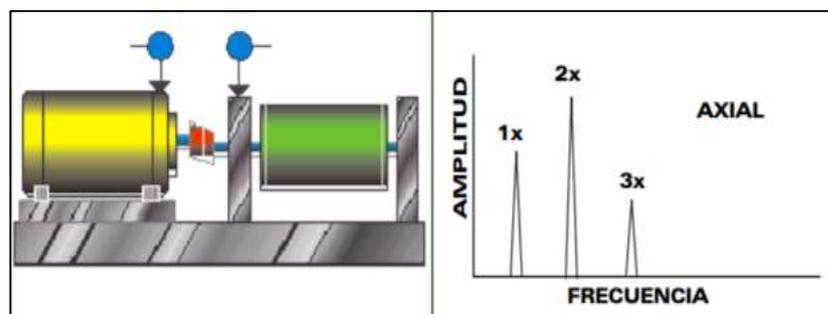
- a) **Desalineación angular:** Se produce cuando el eje del motor y el eje conducido unidos por el acople, no son paralelos. El espectro se puede observar en la figura 10-1, representado por altas vibraciones axiales, 1X RPS y 2X RPS son las más comunes, con desfase de 180 grados a través del matrimonio. En algunas ocasiones se presenta 3X RPS.



**Figura 10-1:** Desalineación angular

Fuente: (A-MAQ, 2005)

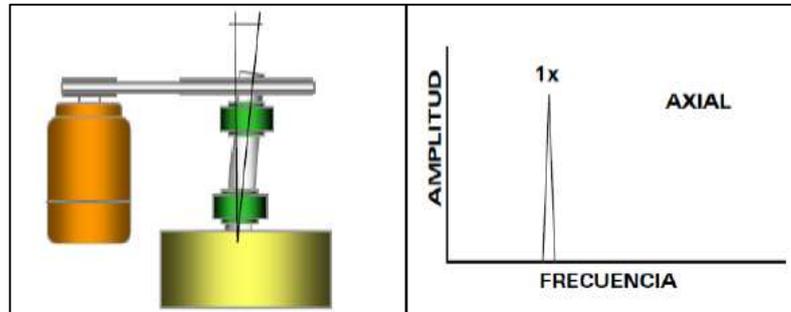
- b) **Desalineación paralela:** Los ejes del motor y el rotor conducido se encuentran paralelos, pero no son colineales. En el espectro de la figura 11-1 se puede observar altas vibraciones radiales a 2X RPS predominante, y a 1X RPS con desfase de 180 grados a través del acople. Cuando hay un aumento en la severidad, se originan picos en armónicos superiores (4x, 8x).



**Figura 11-1:** Desalineación paralela

Fuente: (A-MAQ, 2005)

- c) **Desalineación entre chumaceras:** En una máquina tener en mala posición las chumaceras puede generar que el eje de desacomode, lo cual genera vibraciones en sentido axial y radial. Como se puede observar en la figura 12-1, el pico representativo de la velocidad es 1X RPS, especialmente en sentido Axial.

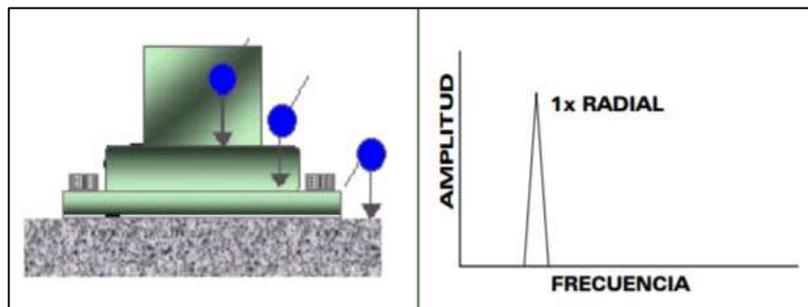


**Figura 12-1:** Desalineación entre chumaceras

Fuente: (A-MAQ, 2005)

#### 1.2.4.3 Soltura Estructural

Se origina por el ablandamiento o desplazamiento del pie de la máquina, por holgura en los pernos de la base o por daño de los elementos de la sujeción. En la figura 13-1 se puede observar el espectro característico que presenta vibración a 1X RPS en la base de la máquina con desfase a 180 grados entre los elementos sujetos en el anclaje.



**Figura 13-1:** Soltura estructural

Fuente: (A-MAQ, 2005)

#### 1.2.5 Norma de severidad ISO 2372

Esta norma proporciona referencias para la aceptación de amplitud de vibración para cuatro tipos de maquinarias rotativas operadas desde 600 hasta 12.000 RPM. Al contrario, con el análisis espectral que se explicó en el apartado anterior, esta norma especifica niveles de velocidad general de vibración. La norma ISO 2372 requiere datos de nivel global de vibración de velocidad en valores RMS provenientes de la máquina para establecer la severidad y cubre un rango de

frecuencias de 10 Hz hasta 1000 Hz. Dispone de principios para clasificar el riesgo de las vibraciones como “buena”, “satisfactoria”, “insatisfactoria” e “inaceptable” para cuatro diferentes tipos de máquina. (Acosta, Molina, 2011) El valor de la severidad de la vibración depende de algunos factores como: el tamaño y masa del cuerpo vibrante, las características del montaje del sistema, la salida y el uso que se le da a la máquina. En la fila izquierda de la tabla 1-1 se observa los rangos de amplitud de vibración en unidades de velocidad [mm/s] en valores RMS, en la fila derecha se observa el tipo de máquina divididas en su respectiva clase y el color representa a la zona que se encuentra el estado de esta. En el Anexo B se puede encontrar detallado de mejor manera esta norma.

**Tabla 1-1:** Norma de severidad ISO 2372

Velocidad (mm/s, rms)	Tipos de máquinas			
	Clase I	Clase II	Clase III	Clase IV
0,18 a 0,28				
0,28 a 0,45				
0,45 a 0,71				
0,71 a 1,12				
1,12 a 1,8				
1,8 a 2,8				
2,8 a 4,5				
4,5 a 7,1				
7,1 a 11,2				
11,2 a 18				
18 a 28				

<b>A</b>	Buena	<b>C</b>	Inatisfactoria
<b>B</b>	Satisfactoria	<b>D</b>	Inaceptable

Fuente: (Mendoza, Miranda, 2014)

### 1.3 Transductores de Vibración

Generalmente existen cuatro tipos de transductores para medir vibraciones. Se conocen como acelerómetros, recolectores de velocidad, sondas de desplazamiento de corriente inducida sin contacto y sondas de desplazamiento con contacto en el eje.

Los acelerómetros son sensores que proporcionan la medición directa de la aceleración y son los transductores de mantenimiento predictivo más comunes usados en la actualidad debido a numerosas razones. Tienen costos relativamente bajos, capacidad de rango de frecuencia mucho más amplias de aproximadamente de 2 a 10.000 Hz. (Berry, 2010)

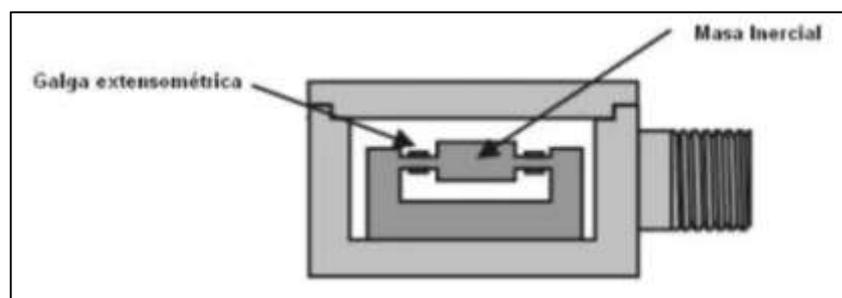
Los acelerómetros son dispositivos capaces de detectar las fuerzas de aceleración, ya sea estática o dinámica. Las fuerzas estáticas incluyen la gravedad, mientras, las fuerzas dinámicas pueden incluir vibraciones y movimiento.

Los acelerómetros pueden medir la aceleración en uno, dos o tres ejes. Los de tres ejes son más comunes conforme los costos de producción de estos baja.

### 1.3.1 Tipos de acelerómetros

Existen varios métodos para medir la aceleración, por tal motivo se mencionará los más importantes:

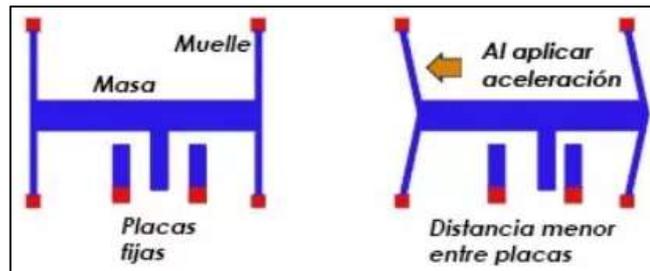
- **Acelerómetros Mecánicos:** utilizan una masa inerte y resortes elásticos. Su medición característica se obtiene mediante galgas extensiométricas, añadiendo sistemas de amortiguación que evitan la propia oscilación. En la figura 14-1 se puede observar un acelerómetro mecánico.



**Figura 14-1:** Acelerómetro mecánico

Fuente: (Monje, 2010)

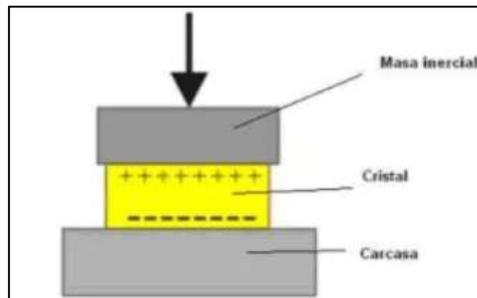
- **Acelerómetros Capacitivos:** Varían la posición relativa de las placas de un micro condensador cuando está sometido a una aceleración. En la figura 15-1 se puede observar un acelerómetro capacitivo.



**Figura 15-1:** Acelerómetro capacitivo

Fuente: (Monje, 2010)

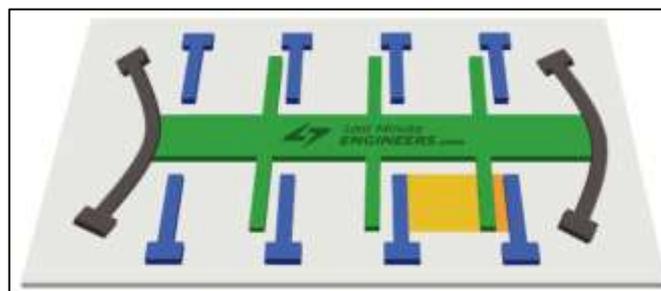
- **Acelerómetros piezoeléctricos:** Se produce una deformación física del material originando un cambio en la estructura cristalina del material, es decir cuando son sometidos a alguna fuerza producen una corriente eléctrica. En la figura 16-1 se puede observar un acelerómetro piezoeléctrico.



**Figura 16-1:** Acelerómetro piezoeléctrico

Fuente: (Monje, 2010)

- **Acelerómetros micromecánicos (MEMS):** Son dispositivos de pequeñas dimensiones conformados por elementos activos y pasivos que realizan diferentes tipos de funciones como percepción, procesamiento de datos, comunicación y actuación sobre el entorno. En la figura 17-1 se puede observar un acelerómetro MEMS.



**Figura 17-1:** Acelerómetro MEMS

Fuente: (Monje, 2010)

### 1.3.2 Criterios de selección de acelerómetros

Para elegir un acelerómetro se debe tomar en cuenta la capacidad que tenga para realizar mediciones en continua o en alterna, el rango de sensibilidad, frecuencia máxima de trabajo y los correspondientes parámetros instrumentales típicos de todo sensor. (Monje, 2010)

En la tabla 2-1 se puede observar las principales características de los acelerómetros y sus aplicaciones, tomando en cuenta que la unidad de medida se expresa en g, lo cual equivale a la gravedad de la tierra de  $9.81 \text{ m/s}^2$ .

**Tabla 2-1:** Tipos de acelerómetro

Tipo de acelerómetro	Margen de medida	Ancho de Banda (Hz)	Ventajas e inconvenientes	Aplicaciones
Micromecánico	De 1,5 a 250g	De 0,1 a 1500	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta sensibilidad</li> <li>- Coste medio</li> <li>- Uso sencillo</li> <li>- Bajas temperaturas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Impacto</li> <li>- ABS</li> <li>- Airbag</li> <li>- Automoción</li> </ul>
Piezo-eléctricos	De 0 a 2000g	De 10 a 20000	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sensibilidad media</li> <li>- Uso complejo</li> <li>- Bajas temperaturas</li> <li>- No funcionan en continua</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vibración</li> <li>- Impacto</li> <li>- Uso industrial</li> </ul>
Piezo-resistivos	De 0 a 2000g	De 0 a 10000	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Respuesta en continua y alterna</li> <li>- Prestaciones medias</li> <li>- Bajo coste</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vibración</li> <li>- Impacto</li> <li>- Automoción</li> </ul>
Capacitivos	De 0 a 1000g	De 0 a 2000	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Funciona en continua</li> <li>- Bajo ruido</li> <li>- Baja potencia</li> <li>- Excelentes características</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uso general</li> <li>- Uso industrial</li> </ul>
Mecánicos	De 0 a 200g	De 0 a 1000	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta precisión en continua</li> <li>- Lentos</li> <li>- Alto coste</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Navegación inercial</li> <li>- Guía de misiles</li> <li>- Herramientas</li> <li>- Nivelación</li> </ul>

Fuente: (Monje, 2010)

### 1.4 Introducción a Motores Eléctricos

Para producir energía mecánica, el motor eléctrico contiene varios componentes los cuales utilizan un campo electromagnético para crear la energía mecánica. Vienen en diferentes tamaños y configuraciones. Algunos motores eléctricos son lo suficientemente potentes para conducir vehículos enteros y otros son tan pequeños los cuales pueden caber en los dispositivos electrónicos más pequeños. (Morales, 2009)

Los motores eléctricos se encuentran entre los medios más eficientes para producir energía mecánica disponible y se utilizan en una increíble variedad de funciones, debido a esa eficiencia son dispositivos muy duraderos.

Los motores eléctricos se pueden encontrar en una gran variedad de aplicaciones, justo en el hogar. Por ejemplo, cada ventilador en el hogar de cualquier persona contenga un motor eléctrico para impulsar las cuchillas, convirtiendo la energía eléctrica en energía mecánica y la energía mecánica de las cuchillas en una brisa para circular el aire por la habitación.

También se pueden encontrar en herramientas eléctricas. Accionan la broca en taladros, la cuchilla en sierras circulares y más. Su longevidad y durabilidad las convierten en soluciones excelentes para esta necesidad, incluso en usos industriales pesados donde otros dispositivos pueden no ser capaces de resistir la tensión soportada por los motores eléctricos.

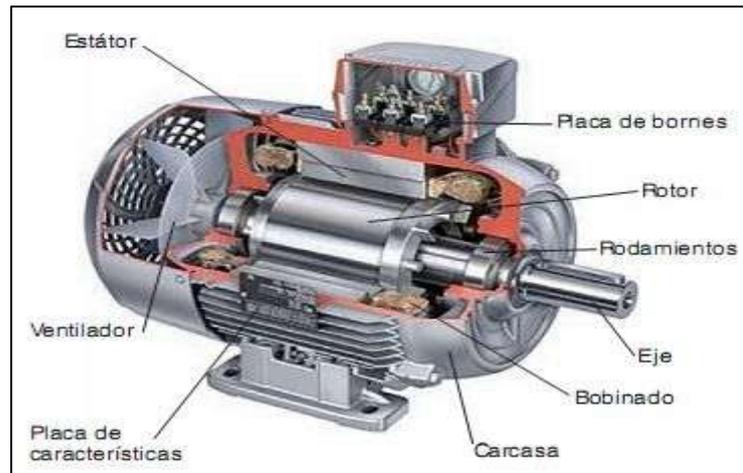
Por ejemplo, los motores eléctricos se utilizan en la mayoría de las estaciones de bombeo, proporcionando agua corriente a los hogares. Los motores eléctricos se utilizan incluso en barcos muy grandes, donde accionan los tornillos los cuales impulsan el barco a través del agua.

#### **1.4.1 *Funcionamiento***

Los motores eléctricos funcionan en un principio muy simple. Según Hyperphysics, cuando se introduce una corriente eléctrica en un campo magnético, se genera una fuerza. Un motor eléctrico utiliza cables en bucle (los mismos cables transportan la corriente), estacionados en ángulos rectos al campo magnético en el motor eléctrico. Debido al campo magnético tiene polaridades dobles, cada extremo de los cables se mueve en una dirección diferente. Esto crea un movimiento de giro. El par se controla agregando varios bucles a las armaduras y el campo magnético es producido por un electroimán. Este diseño permite al rotor girar por una simple fuerza electromecánica, muy pocas piezas realmente experimentan desgaste y, con estos dos factores combinados, los motores eléctricos siguen funcionando durante un tiempo increíblemente largo.

#### **1.4.2 *Partes***

Una de las observaciones más notables de los motores eléctricos es contener muy pocas piezas. Comparado con, por ejemplo, un motor de combustión interna, un motor eléctrico es un dispositivo increíblemente simple. De hecho, todas las diferentes partes de un motor eléctrico podrían extraerse fácilmente y colocarse sobre una mesa muy pequeña, dependiendo del tamaño del motor, por supuesto. En la figura 18-1 se puede observar las principales partes un motor eléctrico.



**Figura 18-1:** Partes de un motor eléctrico

Fuente: (Morales, 2009)

- **Carcasa:** Este es el contenedor en el cual están contenidas todas las diversas partes del motor eléctrico.
- **El eje:** Toma la energía de rotación del giro del motor eléctrico y proporciona un medio para aprovechar esa energía a través de una conexión mecánica: una pieza de metal se extiende a través y fuera del marco.
- **Estator:** Este permanece estacionario, constituyendo generalmente el imán de campo para el motor eléctrico. Puede ser un imán permanente o puede ser un electroimán. Los imanes electromagnéticos incorporan una bobina, generalmente hecha de alambre de cobre.
- **El conmutador:** Ubicado cerca del estator, este componente invierte la dirección actual a través del dispositivo. Se encuentra entre las partes móviles de los motores eléctricos
- **Bobinado:** Se pone en contacto con el conmutador y actúa para completar el interruptor por el cual fluye la corriente
- **Rodamientos:** Los cojinetes de un motor eléctrico están ubicados cerca del punto donde el eje sale del bastidor. Esto permite al eje girar con una fricción mínima y elimina el movimiento no deseado.
- **Armadura:** La armadura es un componente portador de corriente ubicado en el centro del conjunto del motor eléctrico. Interactúa con el imán de campo y el devanado para producir un par mecánico proporcionando rotación al eje.

- **Soporte de extremo:** El soporte de extremo está unido al bastidor en el extremo del eje del motor eléctrico, proporcionando un medio para asegurar el dispositivo y una abertura para el eje.
- **Devanados:** Los devanados resultarán familiares para cualquiera componente eléctrico. Normalmente son bobinados simples de alambre alrededor de un núcleo de hierro magnético. Cuando una corriente pasa a través de estos devanados, generan un campo magnético. Existen dos configuraciones diferentes para los polos de campo de los imanes en estos dispositivos. Un dispositivo de polo saliente tiene un devanado alrededor del polo el cual se encuentra debajo de la cara del polo. Un polo no saliente utiliza las ranuras de la cara del polo para los devanados.
- **Rotor:** El rotor es la parte el cual convierte la energía eléctrica en energía mecánica. Estos vienen en varios diseños. Uno de los mayores avances en el diseño de motores eléctricos fue encontrar una forma en donde el rotor pudiera funcionar continuamente, proporcionando un par ininterrumpido a todo lo cual siendo accionado por el motor eléctrico. Los motores eléctricos de hoy son capaces de producir una increíble cantidad de par.

## 1.5 Tarjeta de control y adquisición de datos

Hoy en día existen numerosas tarjetas de control y adquisición de datos para diversas aplicaciones, como las que se detalla a continuación:

- **Programador lógico programable (PLC):** Es un dispositivo electrónico, el mismo que se encarga de ejecutar un programa de manera cíclica, es decir, que se repite regularmente cada cierto tiempo. Este dispositivo tiene una memoria programable, la misma que se encarga del almacenamiento de diversas instrucciones, de esta forma da paso a implementar funciones específicas que sirvan para el control de procesos. (Moreno, 2002)
- **Tarjeta de adquisición de datos:** Se encarga de adquirir señales analógicas del mundo real ya sea por fenómenos físicos o electrónicos y transformarlos a señales digitales para procesar en una computadora mediante el uso de un software. Se necesita una etapa adicional para acondicionar la señal y eliminar el ruido generado en el proceso para así obtener niveles correctos de medida. Por ejemplo, las señales físicas encontradas en el entorno real son: voltaje, temperatura, presión, corriente, presión y sonido. (National Instruments Corporation., 2015)

## 1.6 Tipos de comunicación

Los tipos de comunicación que van a ser empleadas en la investigación son las siguientes:

- **Modbus TCP:** Es un protocolo de comunicación simple y abierta, diseñado para la supervisión y control de procesos de producción, permite a los equipos de la industria comunicarse con el resto mediante una red de comunicación, estos equipos pueden ser PLCs, computadores, motores y otros dispositivos. En la trama MODBUS-TCP cada solicitud del maestro es tratada de forma independientemente por el esclavo, de esta forma se logra que las transferencias de datos no sufran rupturas debido al ruido en la red. En la versión Modbus-TCP todas las solicitudes y respuestas están diseñadas para verificar que el mensaje ha finalizado y se añade en la cabecera la longitud del mensaje, para conocer los límites de este. (OMROM, 2007)
- **GMS:** La red GSM (Global System for Mobile) es una red de comunicación celulares que posee un gran rango de cobertura inalámbrica y gracias a esto se está volviendo más común en el empleo de módulos GSM/GPRS en aplicaciones industriales de control remoto y monitoreo de variables a través de redes GSM. Esta red digital de teléfono móvil está abierta para el soporte de voz, datos, mensajes de texto y roaming, se caracteriza principalmente por tener una tarjeta-chip SIM (Subscriber Identity Module) la cual se inserta en el teléfono y almacena los datos de identificación del usuario e indistintamente diferentes datos propios del usuario, esta tarjeta SIM tiene capacidades de procesamiento y almacenamiento. (Alvarez, Hernández; 2019)

## 1.7 Equipos comerciales de análisis vibracional

En el mercado nacional e internacional existen varios equipos para el análisis vibracional, los más empleados se mencionan en la tabla 3-1, a continuación:

**Tabla 3-1:** Características de los equipos comerciales de análisis vibracional

	VIBRAcheck 200	VSE002	A4900 Vibrio M
Modo de operación	Manual	Continuo	Manual
Número de canales	2	4	1
Visualización de datos	SI	NO	SI
Software de análisis	SI	SI	NO
Costo	\$2300	\$1485	\$2500

**Realizado por:** Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

Para la validación del sistema se utiliza el equipo patrón VIBRAcheck 200 como se muestra en la figura 19-1, el cual se encuentra disponible en la Escuela de Ingeniería Mecánica para fines investigativos, el cual es un equipo analizador de vibraciones mecánicas de dos canales, la información proporcionada por el fabricante se muestra en el anexo C. Para obtener la trazabilidad\*, se hizo referencia al acelerómetro ICP modelo 603C01 el cual es de tipo B y es utilizado por este equipo, el cual está certificado por la norma ISO-9001(PCB, 2010), dicha norma establece la gestión de calidad de los productos y servicios, esto hace referencia a lo que dice la normativa de análisis vibracional, en la cual un equipo analizador de vibraciones debe brindar el diagnóstico de los espectros en frecuencia para poder determinar el origen de estas y además puede medir los niveles de vibración en unidades de aceleración, velocidad y desplazamiento, el valor de velocidad se rige a la norma ISO 2372. (IDEAR, 2014).



**Figura 19-1:** VIBRAcheck 200

Fuente: (IDEAR, 2014)

### ***1.7.1 Trazabilidad del acelerómetro ICP 603C01***

Los acelerómetros son instrumentos de medidas de precisión. Están altamente diseñados para proporcionar señales eléctricas precisas representativas de la vibración siendo monitoreada. Cada sensor está calibrado en comparación con un nivel de aceleración conocido. Algunas calibraciones incluyen curvas de respuesta de frecuencia, mediciones de frecuencia resonante, sensibilidad transversal, y muchas otras pruebas valiosas.

Aplicaciones requieren un alto grado de precisión, certificación y trazabilidad para obtener resultados completos de la prueba de calibración.

Algunas aplicaciones tienen menos requisitos para la certificación de calibración. Las mediciones de sensibilidad simples a una frecuencia única pueden ser suficiente; verificación operacional y certificados de conformidad con las especificaciones publicadas, pueden satisfacer las necesidades de calibración de muchas empresas. Reduciendo los requisitos de calibración final lo

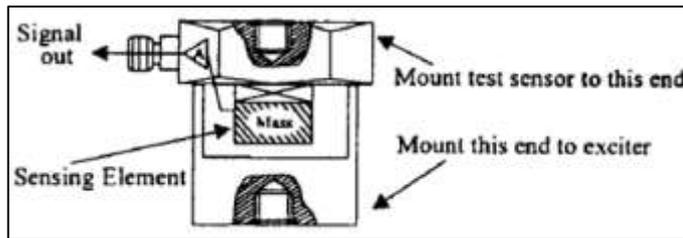
cual disminuye el costo de fabricación del sensor y debería bajar el precio para usuarios de mantenimiento predictivo.

La calibración periódica puede ser requerida por empresas con estrictos requisitos de certificación y trazabilidad. Esto siempre se recomienda que el usuario tenga el sensor calibrado periódicamente, especialmente si el sensor ha experimentado un nivel de choque muy alto o extremas temperaturas por largos períodos de tiempo. Algunas empresas desarrollan capacidades de calibración internas para verificar periódicamente el desempeño de acelerómetros. Hay productos disponibles que proporcionan un conjunto de 1g de nivel de aceleración a una frecuencia fija para una comprobación rápida del sensor. Por estas razones, se recomienda establecer un ciclo de calibración para cada acelerómetro. Este horario es único y está basado en una variedad de factores, como el grado de uso, condiciones ambientales, requisitos de precisión, información de tendencia obtenida de anteriores registros de calibración, regulaciones contractuales, frecuencia de "verificación cruzada" contra otros equipos, recomendación del fabricante y cualquier riesgo asociado con lecturas incorrectas. Estándares Internacionales, como ISO 10012-1, proporcionan información y métodos sugeridos para determinar los intervalos de calibración para la mayoría de los equipos de medición. Con la información anterior y bajo circunstancias normales, se sugiere de 12 a 24 ciclos de calibración mensual para la mayoría de los acelerómetros.

Los servicios de calibración del acelerómetro son típicamente realizados por el laboratorio de metrología interna del IMI. (Otros laboratorios internacionales y privados también están disponibles). El laboratorio IMI está certificado según ISO 9001 conjunto con la ISO 10012-1 (y antiguo MILSTD- 45662A), y utiliza equipos directamente rastreables a NIST. Esto asegura una calibración precisa de especificaciones relevantes. A continuación, se incluye una visión general de la técnica de calibración consecutiva, normalmente usada en la calibración de acelerómetros. Esta técnica proporciona un método rápido y fácil para determinar sensibilidad de un acelerómetro de prueba en un amplio rango de frecuencia.

#### *1.7.1.1 Teoría de la calibración consecutiva*

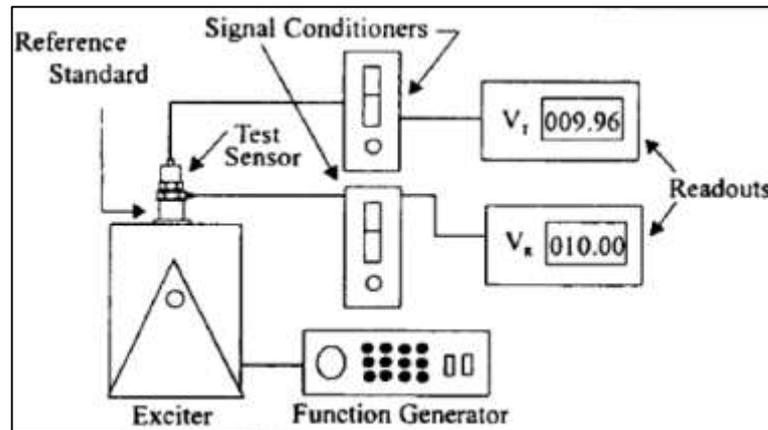
La calibración consecutiva es quizás el método más común para determinar la sensibilidad de acelerómetros piezoeléctricos. Este método se basa en una comparación simple con un sensor previamente calibrado, típicamente referido como una referencia estándar, como se muestra en la figura 20-1



**Figura 20-1:** Acelerómetro de referencia estándar

Fuente: (PCB, 2010)

Estos dispositivos de alta precisión son directamente trazables a un laboratorio de estándares reconocido, son diseñados para la estabilidad, así como configurados para aceptar un acelerómetro de prueba. Al montar una prueba de un acelerómetro de referencia estándar y luego conectando esta combinación a una fuente de vibración adecuada, es posible hacer vibrar ambos dispositivos y comparar los datos como se en la figura 21-1.



**Figura 21-1:** Sistema típico de calibración consecutiva

Fuente: (PCB, 2010)

Debido a que la aceleración es la misma en ambos sensores, la relación de sus salidas ( $V_T / V_R$ ) también debe sea la razón de sus sensibilidades. Con la sensibilidad de referencia estándar ( $S_R$ ) conocido, la sensibilidad exacta del sensor de prueba ( $S_T$ ) se calcula fácilmente usando la siguiente ecuación:

**Ecuación 3-1:** Valor RMS a partir de valor pico de la onda

$$S_T = S_R \left( \frac{V_T}{V_R} \right)$$

En donde:

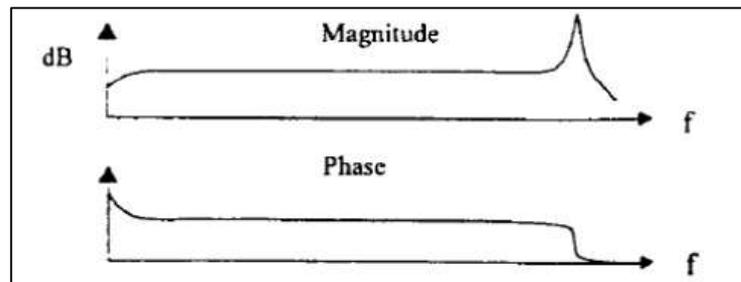
**$S_T$ :** Sensibilidad exacta del sensor de prueba

**$S_R$ :** Sensibilidad de referencia estándar

$V_T$ : Salida del sensor de prueba

$V_R$ : Salida del sensor de referencia

Al variar la frecuencia de la vibración, el sensor puede ser calibrado en todo su rango de frecuencia de funcionamiento. La respuesta típica de un acelerómetro sin filtro se muestra en la Figura 22-1.



**Figura 22-1:** Respuesta típica del acelerómetro de prueba

Fuente: (PCB, 2010)

\* Según el vocabulario de términos básicos y generales en Metrología (VIM-1993), “es la capacidad de relacionar resultados de una medición individual a patrones nacionales o internacionales mediante una cadena ininterrumpida de comparaciones.

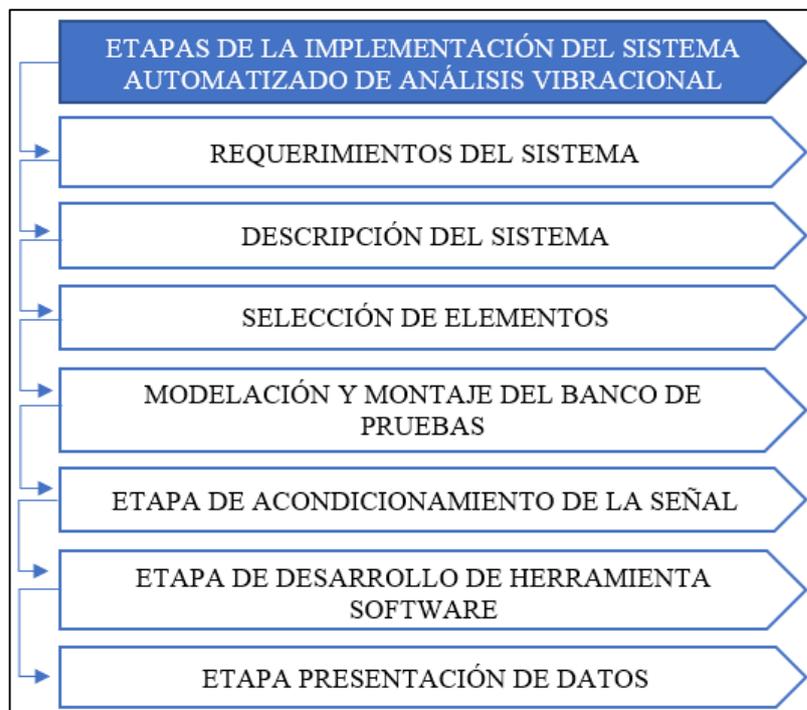
## CAPITULO II

### 2 MARCO METODOLÓGICO

#### 2.1 Introducción

En este capítulo, se presenta las etapas empleadas para la implementación del sistema automatizado de análisis vibracional, en el cual se desarrolla un banco de pruebas para generar escenarios producidos por efectos de vibración en motores eléctricos. Esto será descrito en los requerimientos del sistema, con el fin de identificar y cuantificar las vibraciones mecánicas mediante la elaboración de una herramienta software que realiza un análisis de señales para posteriormente dotar de información importante y elaborar un análisis predictivo de las fallas existentes. Así esto permite a las empresas tomar acciones para optimizar los recursos productivos y de retorno de inversión. La identificación de las fallas más comunes es un punto de partida para continuar la búsqueda de la causa de dichas fallas y lograr eliminar el problema desde su origen.

Para este sistema se emplea una metodología experimental, para obtener resultados cuantitativos y cualitativos. En la figura 1-2, se muestra las etapas:



**Figura 1-2:** Etapas del sistema

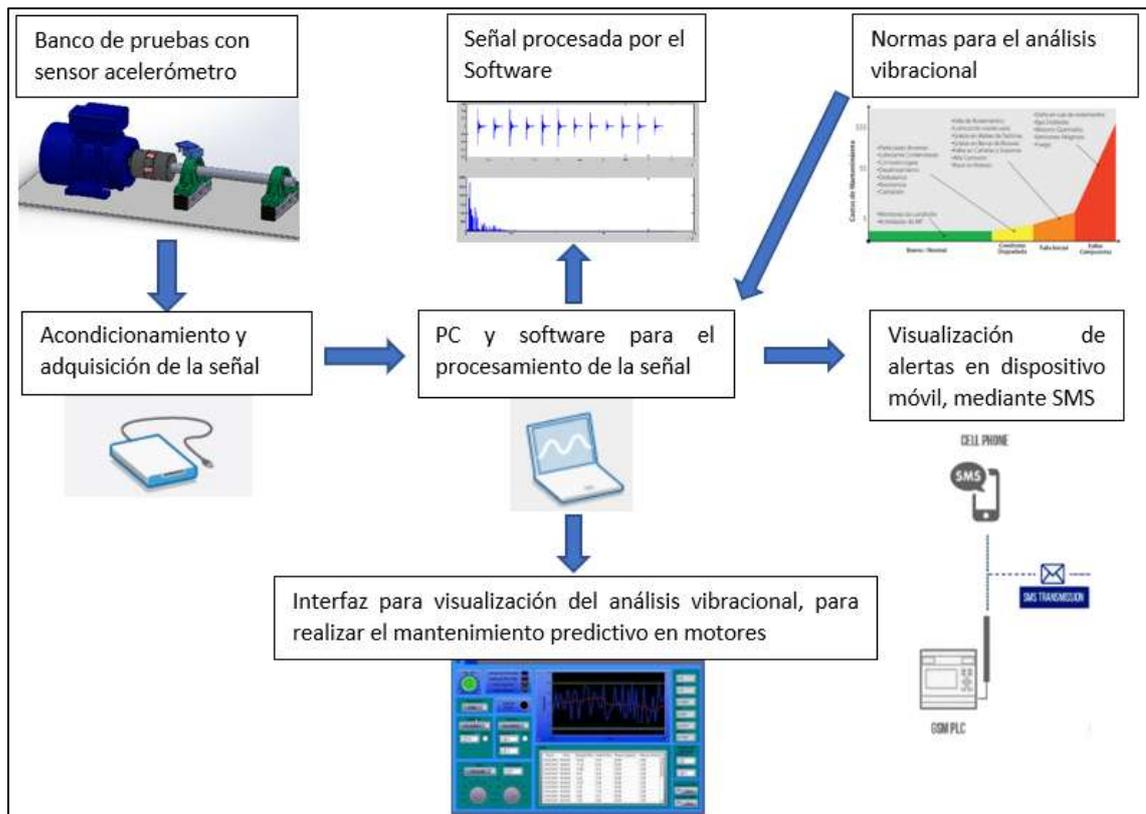
**Realizado por:** Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

## 2.2 Requerimientos del sistema

Una vez identificada la problemática del sistema automatizado de análisis vibracional, se presenta a continuación los requerimientos que el mismo debe tener:

- El sistema debe estar constituido por un banco de pruebas con elementos de nivel industrial.
- El banco de pruebas debe permitir diagnosticar las principales fallas generadas por la vibración.
- Los datos obtenidos por el sensor deben ser adquiridos en tiempo real, para tener un monitoreo continuo del estado del motor.
- Visualizar la severidad de los niveles de vibración, formas de onda y espectros a partir de los datos obtenidos.
- Los indicadores de alertas deben ser mostrados en un dispositivo móvil.
- El sistema debe ser de fácil manejo.

## 2.3 Descripción del sistema



**Figura 2-2:** Topología del sistema automatizado

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

En la figura 2-2 se puede observar la propuesta de un sistema automatizado de análisis vibracional para el mantenimiento predictivo en motores eléctricos, para la adquisición de datos y acondicionamiento de la señal a través de sensores de vibración y transductores adecuados respectivamente. Se realizará un procesamiento de señales que son producidas por efectos mecánicos para adquirir la forma de onda en el tiempo y transformarla a la señal en un espectro de frecuencia utilizando la transformada rápida de Fourier. A raíz de esto se realizará un estudio, donde se determinarán los parámetros de frecuencia y amplitud para establecer su relación directa con el desgaste de la máquina y así determinar la falla presente en función a Normas establecidas, almacenarlas en un archivo Excel, con la finalidad de generar un plan de mantenimiento predictivo, por lo tanto, permita el estado óptimo de los motores, para su posterior visualización en una interfaz la cual emita alertas y además estas alertas podrán ser visualizadas en un dispositivo móvil.

## **2.4 Selección de elementos**

De acuerdo con los requerimientos que el sistema debe tener, se presenta la selección de elementos que componen el sistema. Dentro de esta etapa se aplica el método inductivo, el cual brinda la facilidad de establecer a partir de la observación una adecuada selección de elementos para que el sistema posea un funcionamiento apropiado.

A continuación, se presenta los principales elementos con sus especificaciones y características técnicas provistas por los fabricantes.

### **2.4.1 Selección de elementos mecánicos**

#### **2.4.1.1 Selección del motor**

Para la selección del motor eléctrico, se tomó en cuenta la movilidad del sistema y la tensión de voltaje más común son 110V, por ende, se seleccionó el motor con estas características como se muestra en la figura 3-2.



**Figura 3-2:** Motor eléctrico 110V

**Realizado por:** Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

En la tabla 1-2 se muestra las características técnicas del motor eléctrico.

**Tabla 1-2:** Características técnicas del motor eléctrico

Datos técnicos	Característica
Potencia	550W
Voltaje	110V
Frecuencia	60 Hz
Amperaje	5A
Polos	4
Revoluciones	1700 rpm
Clase	B

**Fuente:** Datos de placa del motor

**Realizado por:** Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

#### 2.4.1.2 Selección de chumaceras

La chumacera junto a su rodamiento se selecciona de acuerdo con el diámetro del eje y de las revoluciones del motor, para su correcto funcionamiento y acoplamiento, como se muestra en la figura 4-2.



**Figura 4-2:** Chumacera P204 y U204

**Realizado por:** Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

En la tabla 2-2 se muestra las características principales de la chumacera.

**Tabla 2-2:** Características chumacera P204 y rodamiento U204

Datos técnicos	Característica
Chumacera	P204
Rodamiento	U204
Diámetro	20 mm
Peso	0.65 Kg
RPM	6000 RPM

Fuente: (KDF, 2015)

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

#### 2.4.1.3 Selección de acople mecánico

El acople escogido para el banco de pruebas es Lovejoy L100, el cual posee un diámetro que se adapta al eje de acero que estará conformando el sistema y son los más utilizados para el enlace de potencia mecánica. En la figura 5-2 se muestra este acople.



**Figura 5-2:** Acople Lovejoy L-100

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

En la tabla 3-2 se muestra las características principales de la chumacera.

**Tabla 3-2:** Características acople flexible de mordaza L100

Datos técnicos	Característica
Tipo	Flexible
Revolución máxima	4500 rpm
Par máximo	24.4 Nm
Desalineación angular/radial	1 grado/ 0.7 mm

Fuente: (LOVEJOY, 2019)

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

#### 2.4.1.4 Selección de polea

La polea tendrá un diámetro externo de 200mm e interno del mismo diámetro del eje de acero del sistema. En la figura 6-2 se muestra la polea, la cual tiene como objetivo agregar carga al sistema.



**Figura 6-2:** Polea

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

#### 2.4.2 Selección de elementos electrónicos

##### 2.4.2.1 PLC RIEVTECH EXM-12DC-DA-RT-GWIFI

Este PLC brinda la facilidad para trabajar con el protocolo Modbus, importante para la comunicación con el software de análisis vibracional, donde destaca que están diseñados con una tecnología GSM lo cual permite enviar alertas a cualquier dispositivo móvil. En la figura 7-2 se muestra el PLC EXM-12DC-DA-RT-GWIFI y en el Anexo D su Datasheet.



**Figura 7-2:** RIEVTECH EXM-12DC-DA-RT-GWIFI

Fuente: (RIEVTECH,2014)

En la tabla 4-2 indica las principales características técnicas del PLC EXM-12DC-DA-RT-GWIFI.

**Tabla 4-2:** Características técnicas PLC RIEVTECH EXM-12DC-DA-RT-GWIFI

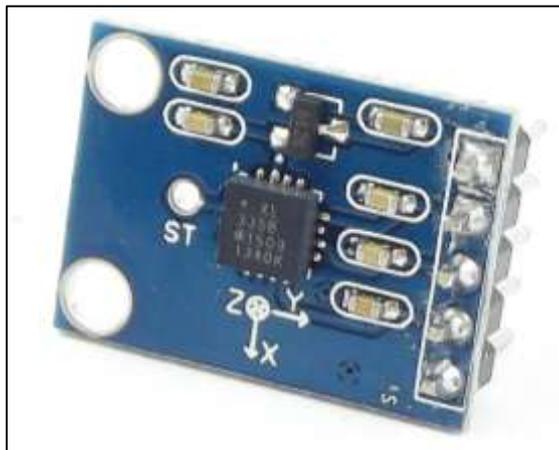
Datos técnicos	Características
Entradas digitales/Analógicas	8 (4 AI 0-10V)
Salidas digitales	6 (Relé 10A)
Alimentación	12-24VDC
Resolución	10 bit, 0.01V
RTC	Si
Wifi	Si, 802,11 b/g/n
GSM/GPRS	Si
Protocolo de comunicación	Modbus RTU/ASCII
Protección	IP20

Fuente: (RIEVTECH,2014)

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

#### 2.4.2.2 Acelerómetro ADXL355

El ADXL355 como se muestra en la figura 8-2 es un acelerómetro triaxial pequeño, delgado, de baja potencia, con salidas de voltaje condicionadas por señal. Además, este sensor necesita de una etapa de acondicionamiento para una correcta medición.



**Figura 8-2:** Acelerómetro ADXL355

Fuente: (ANALOG DEVICE,2010)

En la tabla 5-2 se indica las características técnicas del acelerómetro ADXL355 (Ver Anexo E).

**Tabla 5-2:** Características técnicas del acelerómetro ADXL335

Datos técnicos	Características
Rango de medición[g]	±3.6
Rango de frecuencia [Hz]	0.5 a 1600 ejes X, Y - 0.5 a 550 eje Z
Principio de medición	MEMS
Voltaje de salida a 0g [V]	1.5
Voltaje de Operación [V]	1.8 a 3.6
Sensibilidad [mV/g]	300

Fuente: (ANALOG DEVICES, 2010)

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

#### 2.4.2.3 Selección de tarjeta de adquisición de datos

En la selección de la tarjeta de adquisición de datos, se tomaron en cuenta tarjetas disponibles en la Facultad de Informática y Electrónica, las cuales son usadas en la actualidad en el campo industrial, estas tarjetas proporcionan un rango de operación adecuado para una obtención correcta de la señal proveniente del acelerómetro. A continuación, en la tabla 6-2 se presenta las características técnicas de cada tarjeta:

**Tabla 6-2:** Características técnicas de las tarjetas de adquisición de datos

Características	NI DAQ USB 6008	NI DAQ USB 6009
Entradas y salidas analógicas	8E-2S	8E-2S
Entradas y salidas digitales	12E-12S	13E-13S
Resolución de AI	12 bit	14 bit
Velocidad de muestreo	10 KS/s	48 KS/s
Contador	32 bits	32 bits

Fuente: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2017)

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

Se puede apreciar en la tabla 6-2 que la tarjeta NI DAQ USB 6009 (Ver Anexo F), mostrado en la figura 9-2 presenta mejores características de funcionamiento, resaltando una mayor resolución de 14 bits de la entrada analógica y la velocidad de muestreo de 48 KS/s para una mayor apreciación de la señal en bruto proveniente del sensor.



**Figura 9-2:** NI DAQ USB 6009

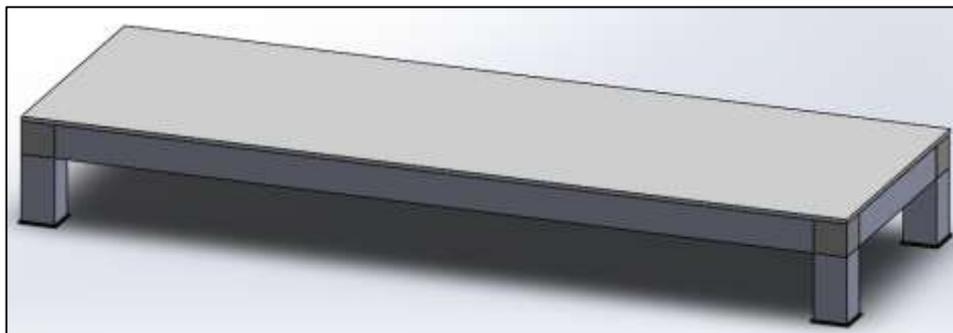
Fuente: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2017)

## 2.5 Modelación y montaje de los elementos del banco de pruebas

Se desarrolla la modelación de los elementos principales utilizados en la construcción del banco de pruebas, como es la parte mecánica, electrónica y de control, para ello se utiliza en el software CAD SolidWorks 2019 y el software CADe-SIMU, con el fin de evitar fallas al momento del montaje.

### 2.5.1 *Diseño de la base principal*

Se realiza una estructura con tubos de aluminio de 1½” para formar una mesa, sobre ella se coloca una plancha de aluminio, la cual contendrá toda la parte mecánica y eléctrica como se muestra en la figura 10-2, es decir, permite que el banco de pruebas sea portable.

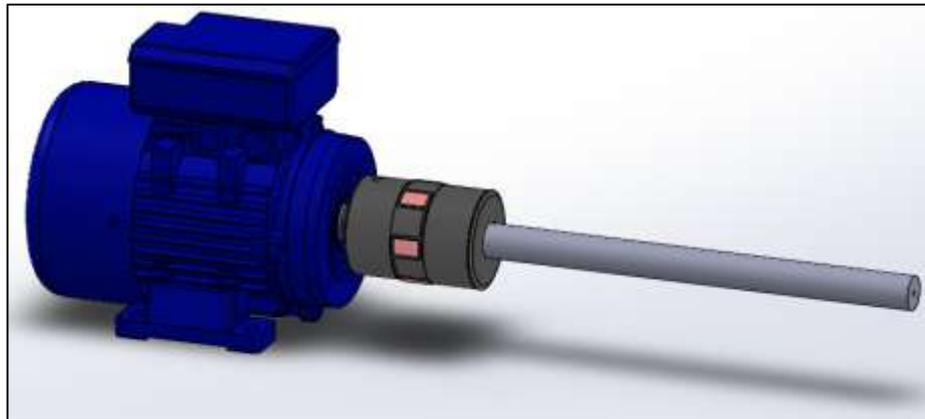


**Figura 10-2:** Base principal del banco de pruebas

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

### 2.5.2 *Diseño de acople mecánico*

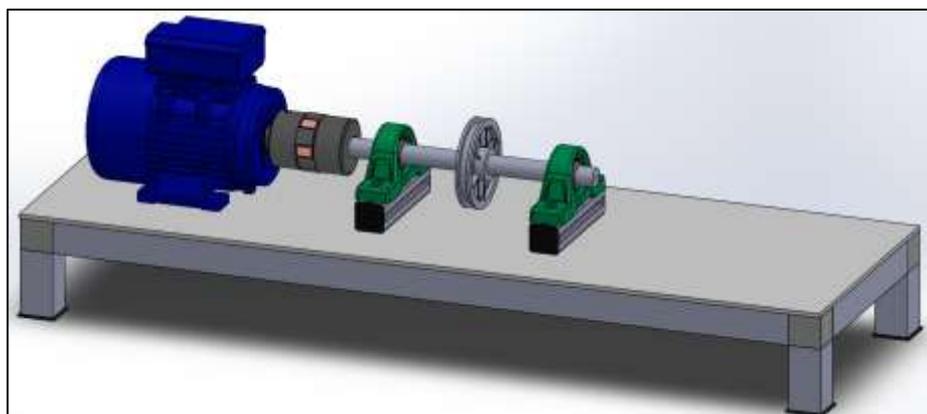
Como se describió los elementos principales que conforman la parte mecánica del banco de pruebas, se procede al acople de cada una de las piezas. En la figura 11-2 se observa el acoplamiento del motor monofásico con el acople Lovejoy L-100 y el eje de acero.



**Figura 11-2:** Montaje del motor, acople y eje de acero

**Realizado por:** Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

En la figura 12-2 se muestra el acoplamiento final de todas las partes mecánicas, donde se adjunta las chumaceras con sus respectivos rodamientos y la polea para simular la presencia de una carga el sistema.



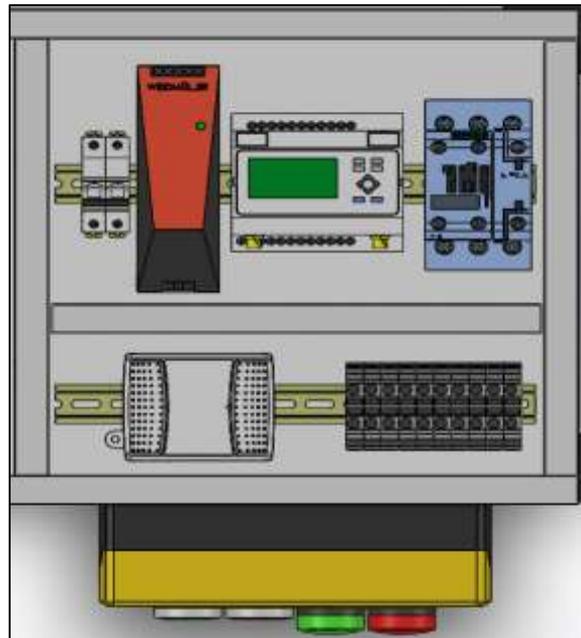
**Figura 12-2:** Montaje de todas las partes mecánicas

**Realizado por:** Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

### 2.5.3 *Diseño del sistema de control y electrónico*

Para la distribución de los componentes eléctricos/electrónicos se diseña su modelo en 3D como se observa en la figura 13-2, con el propósito de brindar una mejor visualización al momento del

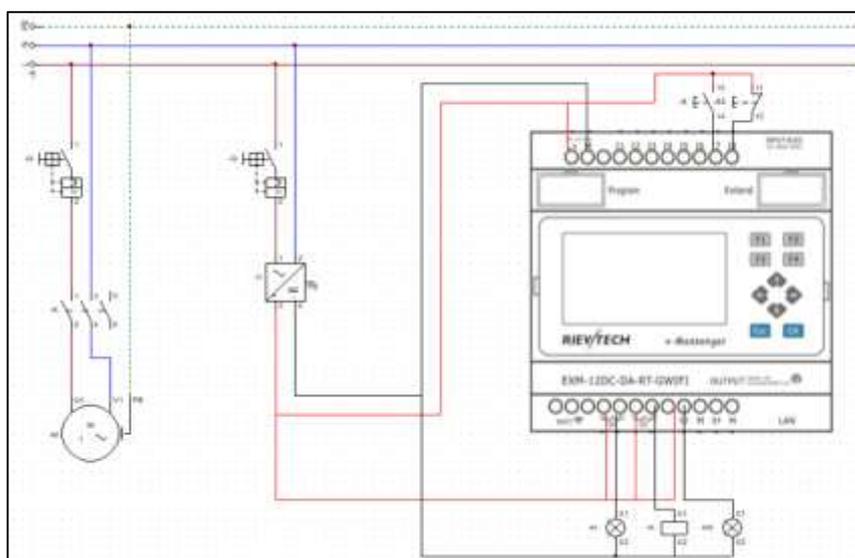
montaje. Se destaca que realizará un accionamiento manual y automático del motor por medio del uso del PLC, además de la tarjeta NI USB-6009 para la adquisición de la señal del sensor.



**Figura 13-2:** Distribución de los componentes eléctricos/electrónicos

**Realizado por:** Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

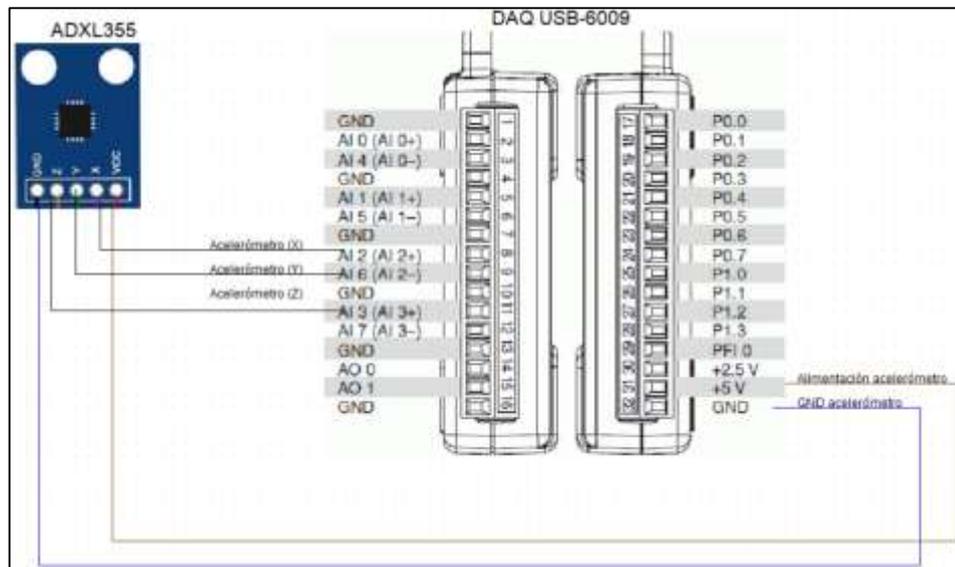
Mediante la utilización del software CADe-SIMU se realiza el esquema eléctrico como se ilustra en la figura 14-2 de los componentes del sistema para el control del encendido del motor mediante el PLC y dentro del mismo se asignarán memorias para usar luego en el desarrollo de la herramienta software.



**Figura 14-2:** Esquema eléctrico del banco de pruebas

**Realizado por:** Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

Finalmente, se realiza el diseño de conexiones del acelerómetro en la tarjeta de adquisición NI USB-6009 como se ilustra en la figura 15-2, de la cual se obtiene la alimentación de 5V para el sensor que provee la misma y la selección de 3 entradas analógicas para los valores de voltaje que envía el sensor.

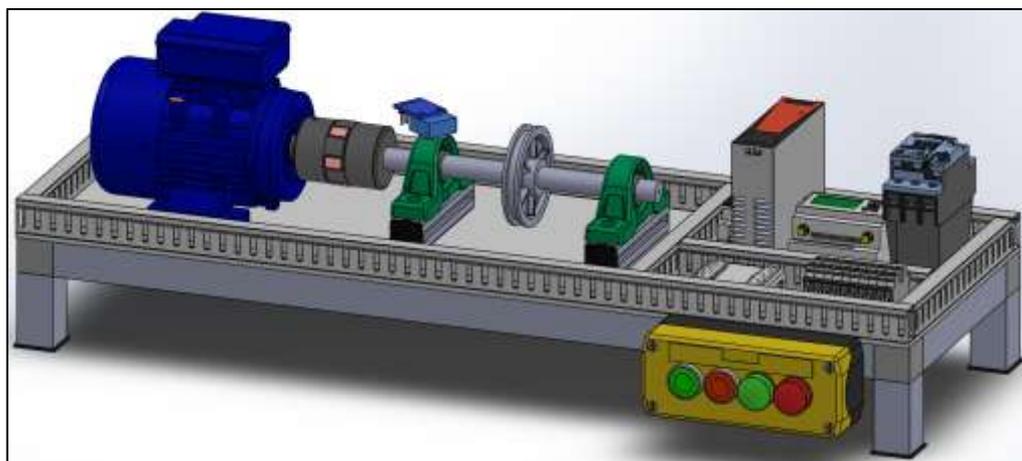


**Figura 15-2:** Conexiones entre acelerómetro y DAQ USB-6009

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

#### 2.5.4 Montaje y visualización virtual del banco de pruebas

Una vez terminado el diseño mecánico y eléctrico-electrónico, se procede a realizar el montaje virtual de todos los elementos como indica en la figura 16-2, para su posterior montaje.



**Figura 16-2:** Visualización virtual del banco de pruebas.

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

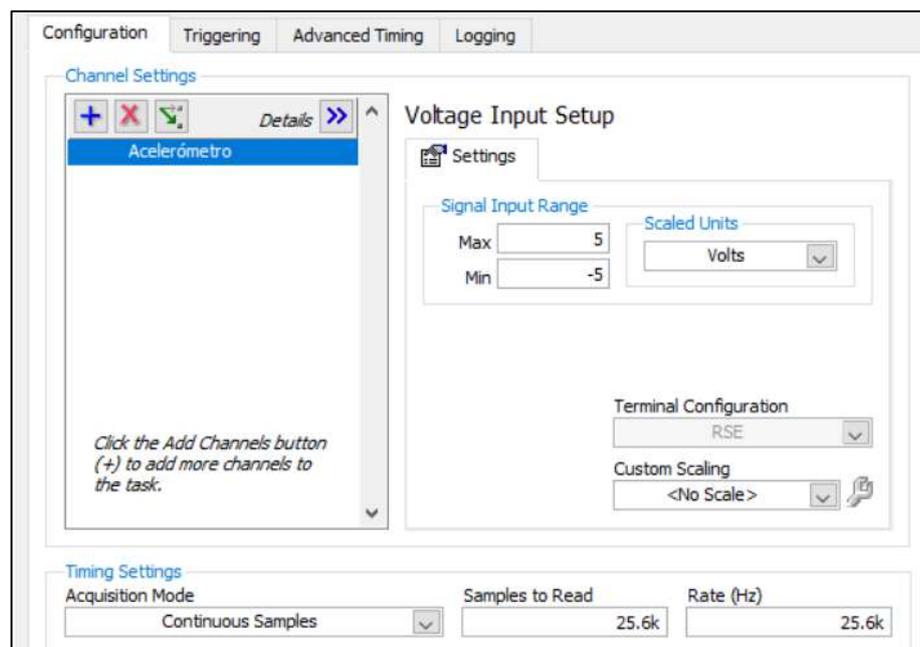
En la figura 17-2 se muestra el montaje final de todos los componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos del banco de pruebas.



**Figura 17-2:** Montaje banco de pruebas del sistema de análisis vibracional  
**Realizado por:** Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

## 2.6 Etapa de adquisición de datos

La adquisición de datos se encarga de tomar la señal de voltaje proveniente del sensor y digitalizarla para su procesamiento dentro del software LabVIEW, para esto se emplea la tarjeta DAQ NI USB-6009, en la cual se conecta la entrada analógica proveniente del acelerómetro y mediante el bloque DAQ Assistant de LabVIEW se configura la misma como se muestra en la figura 18-2.

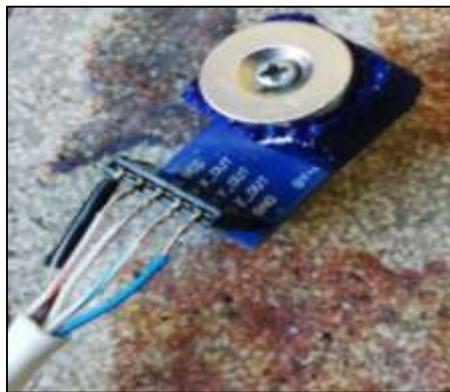


**Figura 18-2:** Configuración del bloque DAQ Assistant para el acelerómetro  
**Realizado por:** Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

En la figura 18-2 se muestra la configuración realizadas como son: adquisición de muestras continuas para obtener valores en tiempo real, el número de muestras que lee la tarjeta es de 25.6KS/S debido a que mientras más muestras se tome se visualiza de mejor manera los datos y finalmente se configura la frecuencia de muestreo debe cumplir con el teorema de Nyquist aunque lo recomendable que sea de 4 a 5 veces mayor la frecuencia máxima del sensor por lo tanto se estableció una frecuencia de muestreo de 25.6kHz.

Como se había mencionado para obtener mediciones reales se necesita realizar un acondicionamiento de la señal proveniente del acelerómetro, como primer paso es adecuarlo para poder tomar mediciones en rodamientos o en puntos donde se transfieran las fuerzas vibratorias del banco de pruebas, como se aprecia en la figura 19-2 consta de un imán de neodimio para la fijación de este.

Además, se toma en cuenta los sentidos principales de medición como son: axial, radial y tangencial. Se eligieron 3 puntos de medición, para tener un fácil acceso en la adquisición de los datos del sensor, dichos puntos permiten realizar medidas en sentido radial-vertical, lo cual se asocia al sentido Y del sensor y en base a lo establecido en las cartas de Charlotte, se pueden detectar fallos de desequilibrio, desalineación y holgura mecánica.



**Figura 19-2:** Estructura del acelerómetro

**Realizado por:** Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

Posteriormente, el acondicionamiento de la señal se lo realizará en el software, previo a la obtención de la ecuación característica del sensor, a través de los valores de salida máximo y mínimo del sensor, esto debido a que la señal de salida es en Voltios y es necesario convertirla en valores de aceleración para su posterior estudio.

Para realizar esto se parte de los datos proporcionados por el Datasheet mostrados en la tabla 5-2 como son: valor de voltaje de salida a 0g de 1.5 V, sensibilidad de 300mV/g y un rango de

medición de  $\pm 3.6g$ .

Primero, se obtiene la variación de voltaje por medio de la sensibilidad y rango de medición dando como resultado  $\pm 1.04V$ , realizado esto se obtiene un voltaje mínimo de  $0.42V$  y un voltaje máximo de  $2.58V$ .

Con los valores obtenidos se procede a la obtención de la ecuación característica del acelerómetro de acuerdo con la ecuación 1-2.

**Ecuación 1-2:** Ecuación característica del acelerómetro

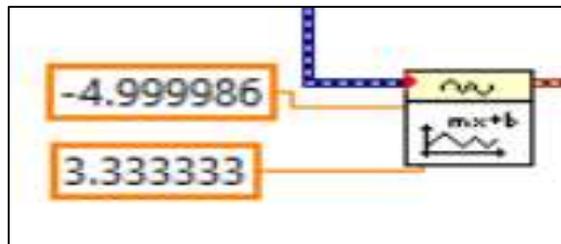
$$a = 3.3333 \times Vin - 4.999986$$

En donde:

**a:** Aceleración en g

**Vin:** Voltaje proporcionado por el sensor

Obtenida la ecuación 1-2 da como resultado un valor de escalado de  $3.3333$  y un valor de offset de  $-4.999986$  los mismos son configurados en el bloque Waveform Scale and Offset de LabVIEW mostrado en la figura 20-2.



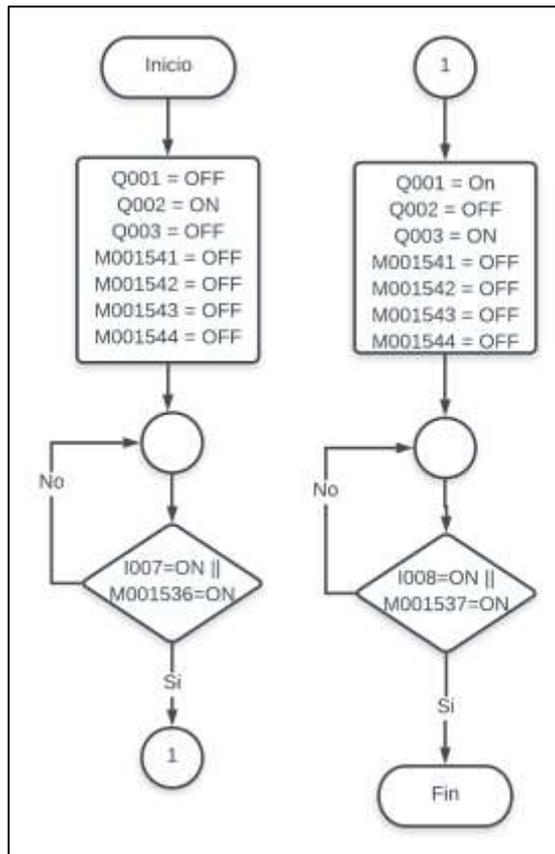
**Figura 20-2:** Acondicionamiento de señal del acelerómetro

**Realizado por:** Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

## 2.7 Etapa de desarrollo de la herramienta software

### 2.7.1 Programación del PLC

Para la programación del PLC RIEVTECH se emplea el software libre eSms config donde se muestra su programación en el anexo G, a continuación, en la figura 21-2 se muestra el diagrama de flujo que representa el proceso para el encendido, apagado del motor, envío de mensajes y en la tabla 7-2 la asignación de entradas y salidas del PLC.



**Figura 21-2:** Diagrama de flujo que representa la programación del PLC RIEVTECH

**Realizado por:** Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

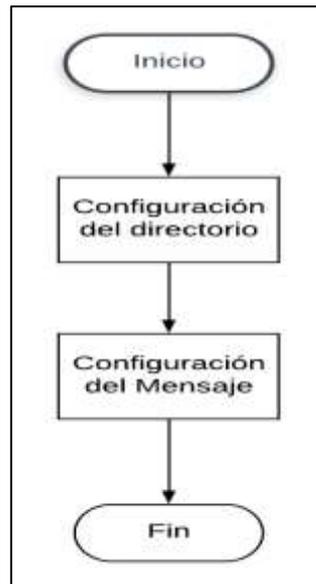
**Tabla 7-2:** Asignación de entradas y salidas

Entradas	Conexión	Salida	Conexión
I007	Pulsador encendido	Q001	Luz piloto verde
I008	Pulsador apagado	Q002	Luz piloto roja
		Q003	Contactador
		MsgQ01	Mensaje alerta 1
		MsgQ02	Mensaje alerta 2
		MsgQ03	Mensaje alerta 3
		MsgQ04	Mensaje alerta 4

**Realizado por:** Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

La configuración de la red GSM para enviar mensajes de alertas, se debe configurar dentro del software, el directorio telefónico, el cual almacenará los números telefónicos de los destinatarios que se ingrese.

Una vez realizado esto se configura la ventana para el envío de mensajes, donde consta cual es el texto, formato, número telefónico a ser enviado, estos mensajes serán enviados por medio de la orden provista por el software LabVIEW, este proceso se muestra en la figura 22-2.



**Figura 22-2:** Directorio telefónico

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

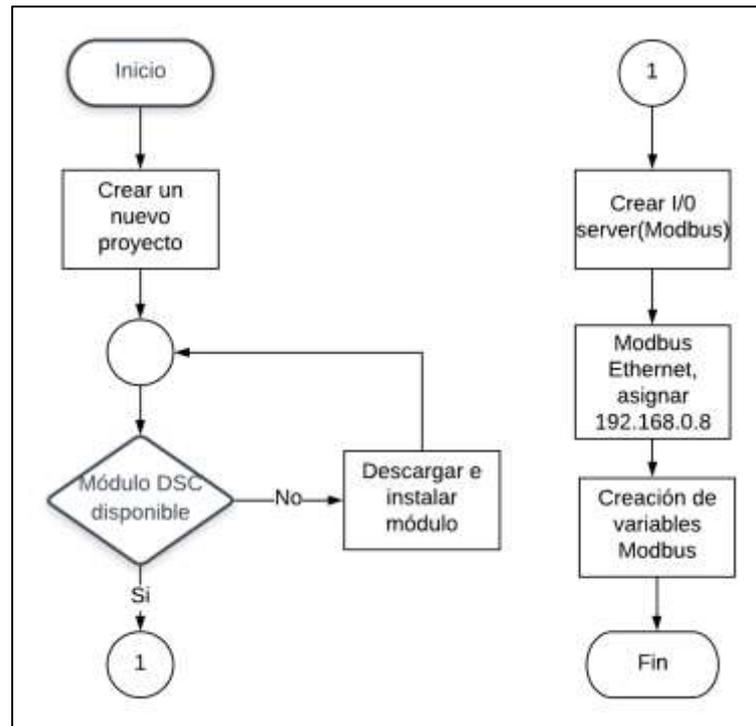
## 2.7.2 Programación de la interfaz en el software LabVIEW

### 2.7.2.1 Configuración MODBUS TCP

La comunicación es realizada entre el software LabVIEW y el PLC para obtener los datos provenientes del mismo. En la figura 23-2 se muestra el diagrama flujo para realizar este proceso y en el Anexo H la programación, a continuación, se detalla el mismo:

- Se procede a crear un nuevo proyecto y un nuevo VI.
- Para visualizar los datos en LabVIEW provenientes del PLC se crea una comunicación con el mismo por medio de MODBUS TCP, a través, de I/O Server y se selecciona MODBUS.

- Ahora se procede a configurar el nuevo Server, se selecciona el modelo Ethernet, con un tiempo de retardo bajo y finalmente se ingresa la dirección IP asignada al PLC.
- Una vez realizado la configuración del nuevo Server se procede a agregar las direcciones MODBUS para obtener acceso a ellas y poder controlarlas desde el software LabVIEW, estas memorias serán ingresadas de acuerdo con las memorias previamente asignadas dentro de la programación del PLC como se indica en la tabla 8-2.



**Figura 23-2:** Configuración de un nuevo proyecto

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

**Tabla 8-2:** Direccionamiento MODBUS

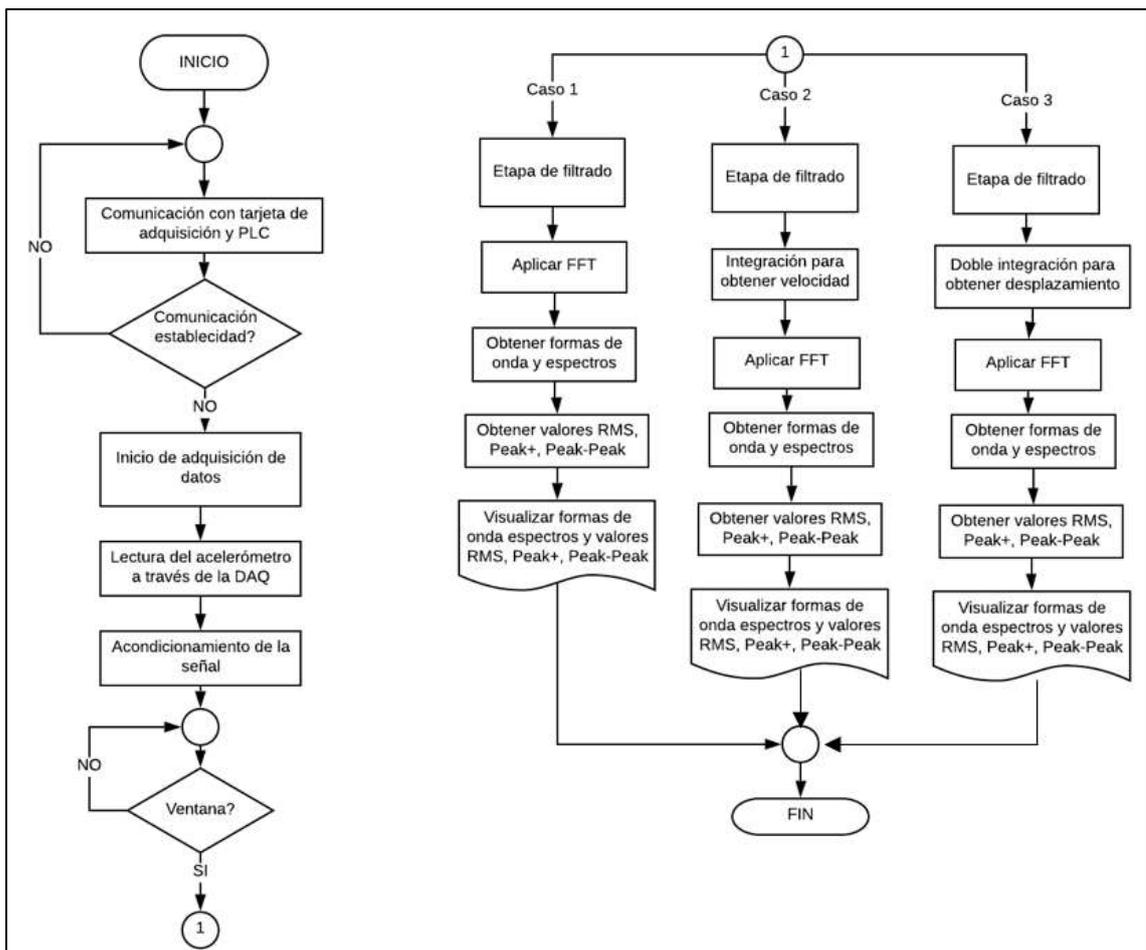
<b>Entradas Digitales</b>	<b>Memoria MODBUS</b>	<b>Salidas Digitales</b>	<b>Memoria MODBUS</b>
I007	001537	Q001	001539
I008	001538	Q002	001540
		Q003	001541
		MsgQ01	001542
		MsgQ02	001543
		MsgQ03	001544
		MsgQ04	001545

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

### 2.7.2.2 Desarrollo de la interfaz del sistema en LabVIEW

Como ya se había mencionado para el desarrollo de la interfaz del sistema de análisis vibracional se hace uso del software LabVIEW, el cual es muy empleado a nivel industrial por sus complementos, comunicación y disponibilidad.

En la figura 24-2 se muestra el diagrama de flujo el cual muestra la secuencia de pasos y proceso que se realiza para el desarrollo de la interfaz del sistema y la programación en el Anexo I.



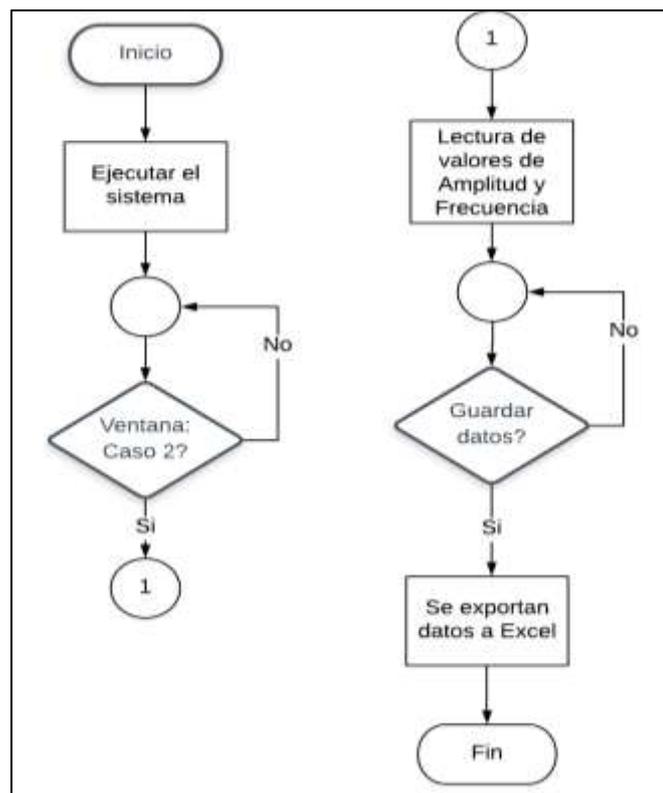
**Figura 24-2:** Diagrama de flujo para el desarrollo de la interfaz PVA

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

Una vez adquirida la señal proveniente del sensor, se la acondiciona y se realiza una etapa de filtrado mediante el empleo de un filtro pasa banda para eliminar frecuencias indeseadas que no se encuentren dentro de este rango, estos rangos serán definidos en cada unidad de medición, los mismos se deben encontrar en el rango de medición provisto por el sensor.

Para la etapa de filtrado de la señal de aceleración, se aplica un filtro pasa banda de 5 - 1.6 KHz, una vez realizado esto se procede a obtener su gráfica y mediante la utilización del bloque Spectral Measurements se obtiene la gráfica en el dominio de la frecuencia por medio del empleo de la FFT, obteniendo de esta gráfica los valores de amplitud y frecuencia de los picos encontrados, además se obtiene los valores Rms, Peak +, Peak-Peak de la señal filtrada.

Según las normas establecidas para análisis de vibraciones la señal que debe ser estudiada es la de velocidad, esta se puede obtener al aplicar una integración de la señal de aceleración por medio del empleo del bloque SVL Integration VI, el cual emplea un filtro pasa alto para eliminar las componente DC de la señal, se realiza el mismo procesamiento de señal que el de la aceleración, pero en la etapa de filtrado se aplica un filtro pasa banda de 10 – 1000 Hz, adicionalmente se realiza la importación de los valores de amplitud y frecuencia a una tabla los cuales son importantes para determinar los fallos en máquinas, estos datos generados en la tabla pueden ser exportados a una archivo de Excel para su posterior archivo como se ilustra en la figura 25-2.



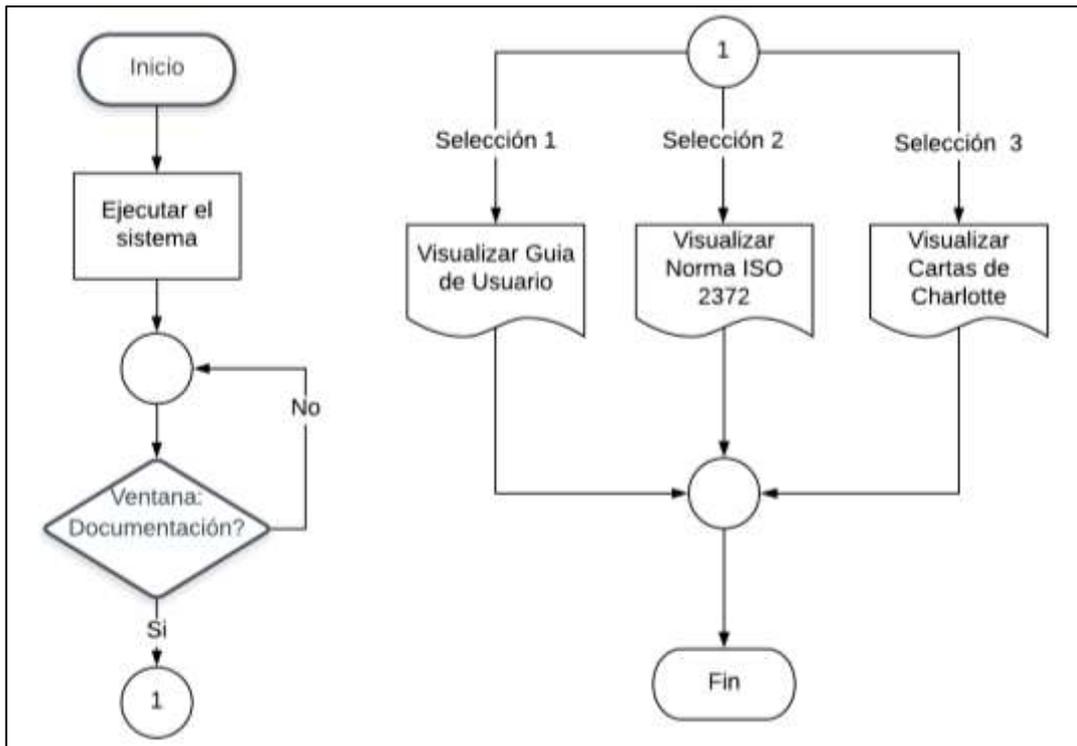
**Figura 25-2:** Diagrama de flujo para la exportación de datos

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

Para obtener la señal de desplazamiento de debe aplicar una doble integración a la señal de aceleración y de igual manera como se realizó el procesamiento de la señal de aceleración se realiza lo mismo a la señal de desplazamiento, pero en la etapa de filtrado se aplica un filtro pasa

banda de 5 – 200 Hz, sin hacer ningún tipo de análisis más profundo debido a que se aplica a frecuencias de estudio bajas.

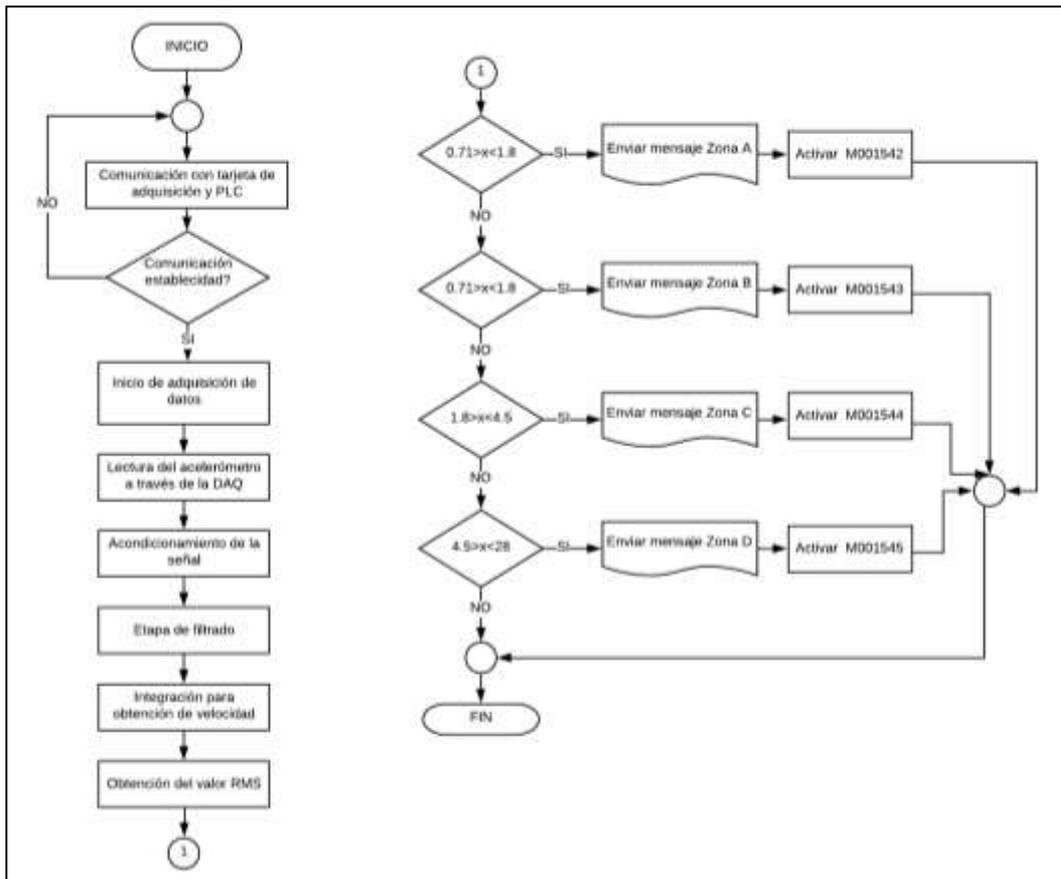
Adicional se realiza la programación para la visualización de documentación, como se indica en la figura 26-2, referente al estudio de los espectros de vibraciones como son las Cartas de Charlotte, la guía de usuario y la Norma ISO 2372 la cual se encarga de evaluar los niveles de vibración para determinar su severidad.



**Figura 26-2:** Diagrama de flujo para la visualización de la documentación

**Realizado por:** Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

Finalmente se realiza la programación para la evaluación de severidad de la vibración en valores RMS de velocidad según lo establecido por la Norma ISO 2372, estos valores de vibración serán visualizados por un indicador gráfico, el cual indicará en qué nivel de severidad se encuentra el sistema, a partir de estos valores por medio del empleo de memorias Modbus, se realiza el envío de los mismos para que el PLC RIEVTECH mediante su módulo GSM envíe mensajes de alerta con estos niveles de severidad, con el fin de tener un monitoreo continuo en tiempo real, en caso de recibir una alerta la persona que recibe puede realizar una acción la cual permita la disponibilidad del sistema en medición.



**Figura 27-2:** Diagrama de flujo para la evaluación de severidad norma ISO 2372

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

## 2.8 Etapa de presentación de datos

Una vez finalizado toda la programación necesaria para realizar la interfaz del sistema de análisis de vibraciones se ilustra en la figura 28-2 como queda la interfaz de la ventana principal, la cual consta con un tablero de control en el cual se realiza el control del encendido y apagado del motor, además de indicar sobre el nivel y evaluación de la severidad de la vibración en varios indicadores.

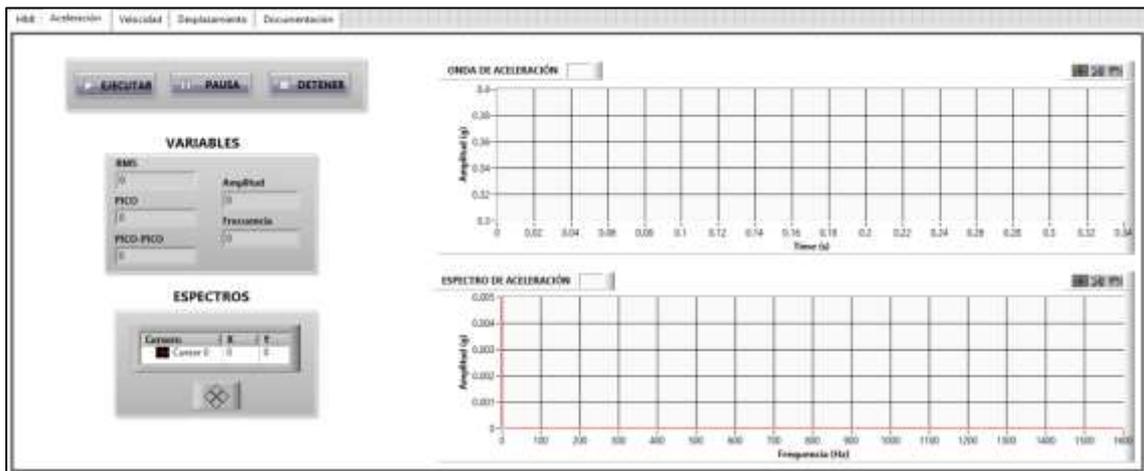


**Figura 28-2:** Interfaz de la pantalla principal

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

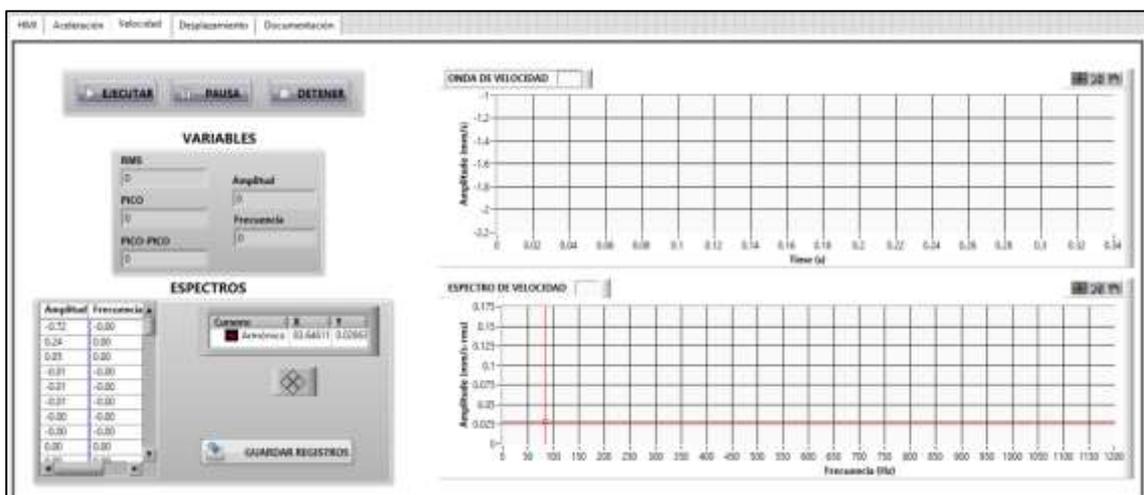
En las figuras 29-2, 30-2 y 31-2 corresponden a la aceleración, velocidad y desplazamiento respectivamente proveniente del sensor, en donde, se muestra las gráficas con respecto al tiempo y frecuencia, además de los valores Rms, Peak+, Peak-Peak.

La figura 30-2 muestra además en una tabla los valores de amplitud y frecuencia obtenidos del espectro de velocidad, además estos pueden ser guardados en un archivo.



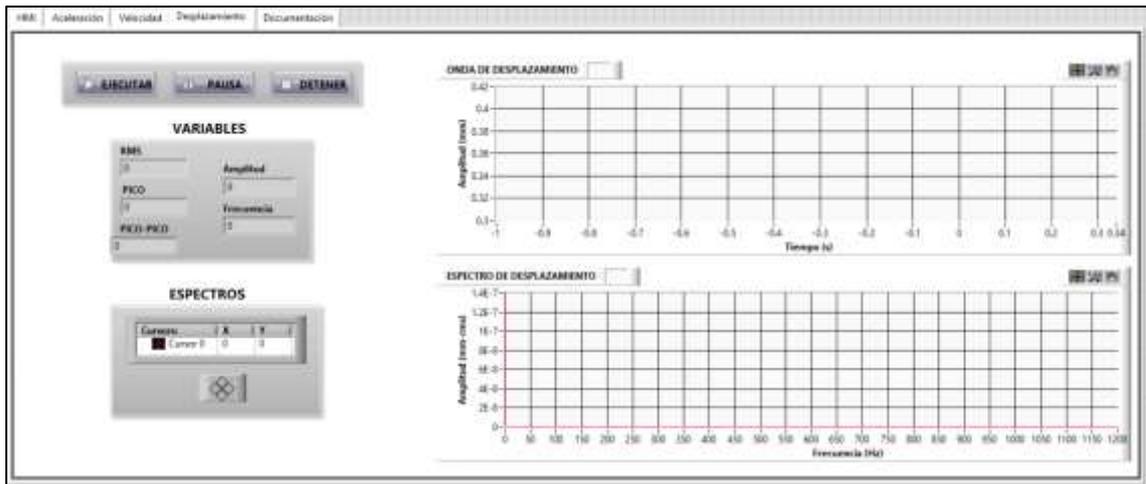
**Figura 29-2:** Interfaz de la señal de aceleración

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019



**Figura 30-2:** Interfaz de la señal de velocidad

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019



**Figura 31-2:** Interfaz de la señal de desplazamiento

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

Finalmente, la última interfaz mostrada en la figura 32-2 corresponde a la visualización de la documentación referente al análisis vibracional.



**Figura 32-2:** Interfaz para la visualización de la documentación

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

En las interfaces del sistema de análisis vibracional constan de los siguientes indicadores y elementos principales para el control del sistema automatizado:

- **Botón de Inicio:** Permite el encendido del banco de pruebas.
- **Botón de Paro:** Permite el paro del banco de pruebas.
- **Botón de Ejecutar:** Permite la inicialización de la interfaz de análisis de vibraciones.
- **Botón detener:** Permite salir del software de análisis de vibraciones.

- **Botón Pausa:** Permite pausar la interfaz de las señales para su mejor visualización.
- **Botón Guardar registros:** Permite la exportación de los datos generados en la tabla mostrada a un archivo Excel.
- **Botón Guía de usuario:** Permite la visualización de la guía de usuario (Ver Anexo J)
- **Botón Cartas de Charlotte:** Permite la visualización de las cartas de Charlotte
- **Botón Norma ISO 2372:** Permite la visualización de las Normas ISO 2372
- **Menú de clase de equipo:** Permite la selección de las diferentes clases de equipos, los cuales están establecidos en la norma ISO 2372.
- **Indicador de nivel de vibración:** Se visualiza el valor Rms de velocidad con su respectiva unidad de medida, y además indica en que zona se encuentra el equipo.
- **Evaluación de severidad:** Indica los niveles de la evaluación de severidad.
- **Indicadores de variables:** Muestran los valores de Rms, Peak+, Peak-Peak, amplitud y frecuencia de la señal en estudio.
- **Espectros:** Maneja un cursor el cual se puede posicionar para obtener el valor de amplitud y frecuencia de un punto específico.

## CAPITULO III

### 3 MARCO DE RESULTADOS, DISCUSIÓN Y ANÁLISIS

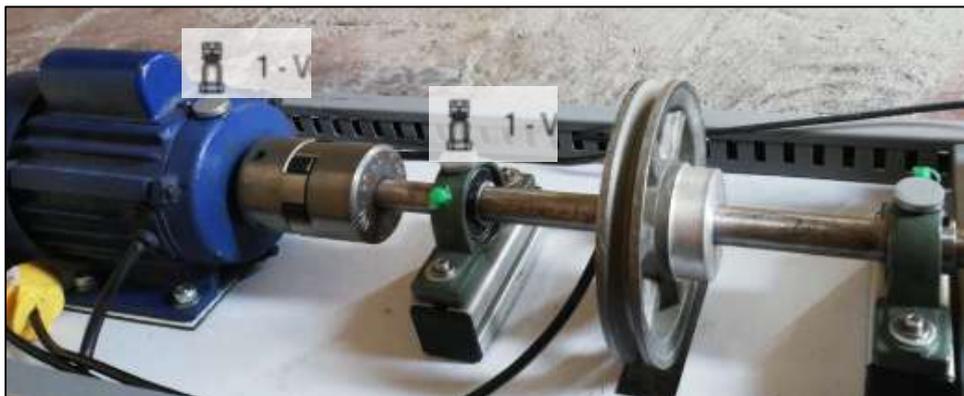
En el presente capítulo se realizan pruebas de validación del funcionamiento del sistema, envío de alertas de severidad a través de GSM a un dispositivo móvil, elaboración del plan de mantenimiento predictivo, consumo de energía y análisis de costos.

#### 3.1 Validación del funcionamiento del sistema

El sistema ha sido diseñado con el fin de desarrollar una herramienta para el análisis vibracional, mediante el análisis de severidad de las vibraciones y de la presentación de sus espectros para poder diagnosticar el respectivo origen de la falla. Para validar si el sistema PVA cumple con la norma establecida para su correcto análisis vibracional se procedió a comparar con el sistema VIBRAcheck 200.

##### 3.1.1 Comparación del sistema Predictive Vibration Analysis con VIBRAcheck 200

Para realizar la comparación del sistema como se detalló anteriormente se realizó un banco de pruebas en el cual se tomará mediciones en los puntos asignados mostrados en la figura 1-3 para la colocación del acelerómetro



**Figura 1-3:** Puntos de medición del banco de pruebas

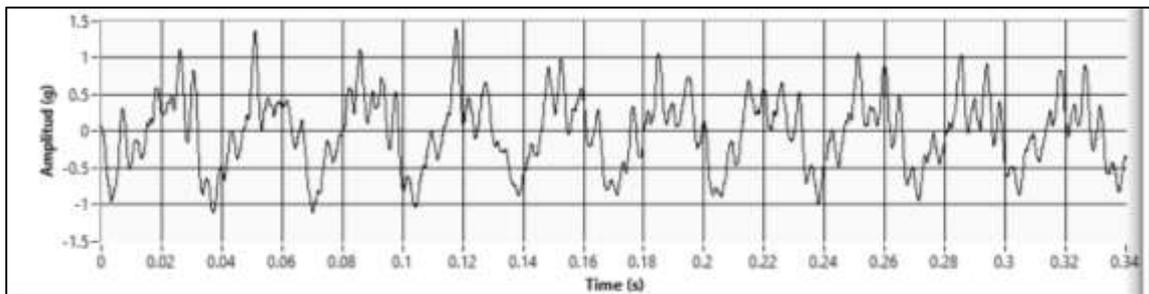
Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

Una vez determinado los puntos de medición se procede a la comparación de las formas de onda y espectros de aceleración, velocidad y desplazamiento, valores de nivel global de vibración, valores de amplitud y frecuencia de los espectros obtenidos.

El objetivo de realizar estas mediciones es efectuar una comparación, para saber la precisión del sistema Predictive Vibration Analysis en comparación con el equipo VIBRAcheck 200 con su respectivo software MAINTraQ Predictive 2.1, equipo disponible en la Facultad de Mecánica.

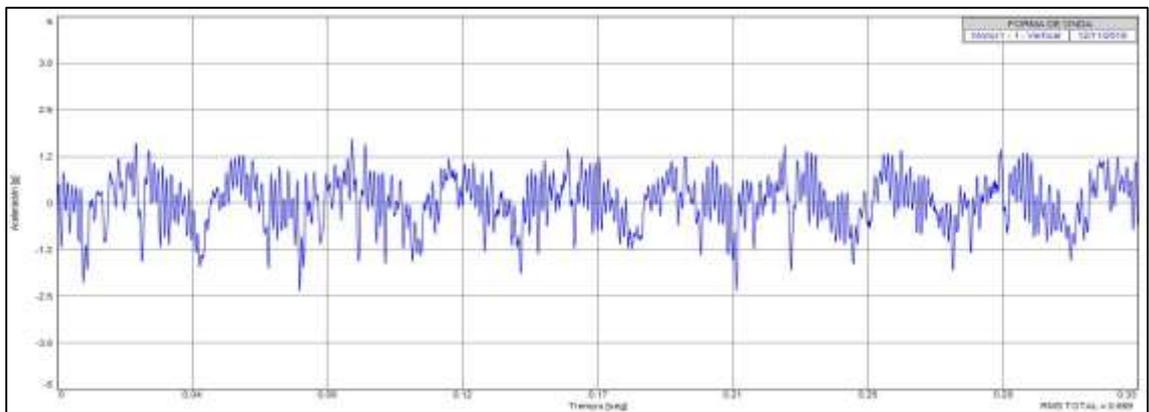
### 3.1.1.1 Comparación formas de onda

Las gráficas desde la 2-3 hasta 7-3 muestran las formas de onda obtenidas de las mediciones en el punto 1, y en las tablas desde 1-3 hasta 3-3 indican los niveles globales de vibración.



**Figura 2-3:** Forma de onda de la aceleración del punto 1 PVA

**Realizado por:** Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019



**Figura 3-3:** Forma de onda de la aceleración en el punto 1 VIBRAcheck

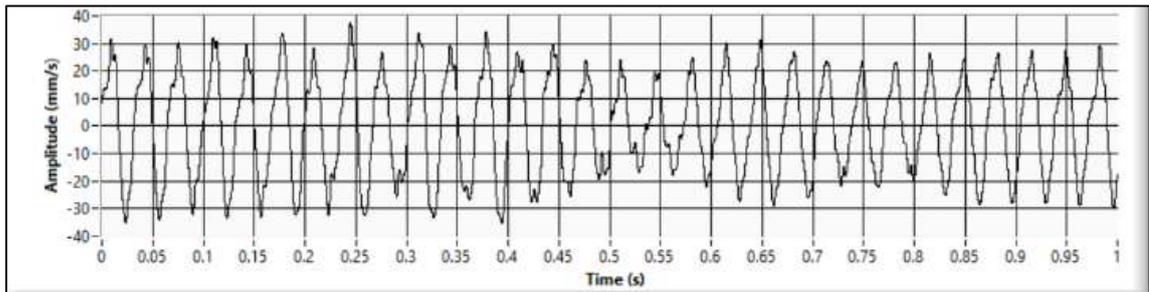
**Realizado por:** Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

**Tabla 1-3:** Vibración global de la aceleración en el punto 1

<b>Forma de onda de aceleración punto 1</b>	
<b>VIBRAcheck</b>	0.659 g
<b>PVA</b>	0.648 g

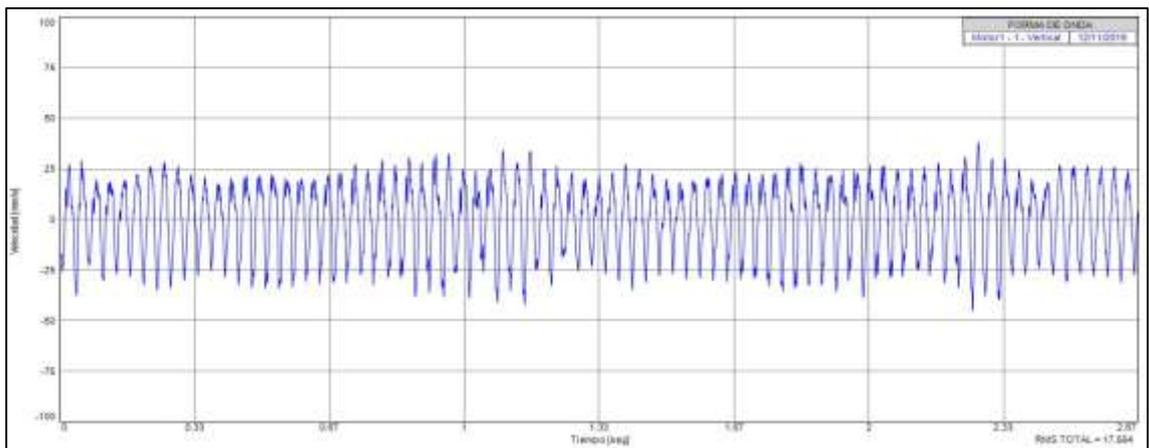
**Realizado por:** Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

En las figuras 2-3 y 3-3 se observa las formas de ondas características de vibración en unidades de aceleración del punto 1, que son el resultado de la suma de vibraciones simples dando origen a una vibración compleja, estas gráficas están cargadas de mucha información, por lo cual no se puede dar un diagnóstico a partir de las mismas. Pero se observa que las formas de onda de los dos sistemas muestran gran similitud y los valores de vibración global de aceleración de la tabla 1-3 presentan un error absoluto de 0.011 y un error relativo de 1.67 %.



**Figura 4-3:** Forma de onda de la velocidad en el punto 1 PVA

**Realizado por:** Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019



**Figura 5-3:** Forma de onda de la velocidad en el punto 1 VIBRAcheck

**Realizado por:** Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

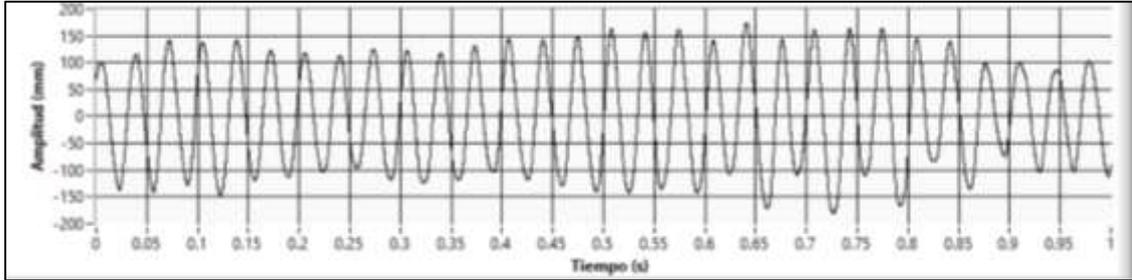
**Tabla 2-3:** Vibración global de la velocidad en el punto 1

<b>Forma de onda de velocidad punto 1</b>	
<b>VIBRAcheck</b>	17.564 mm/s
<b>PVA</b>	17.945 mm/s

**Realizado por:** Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

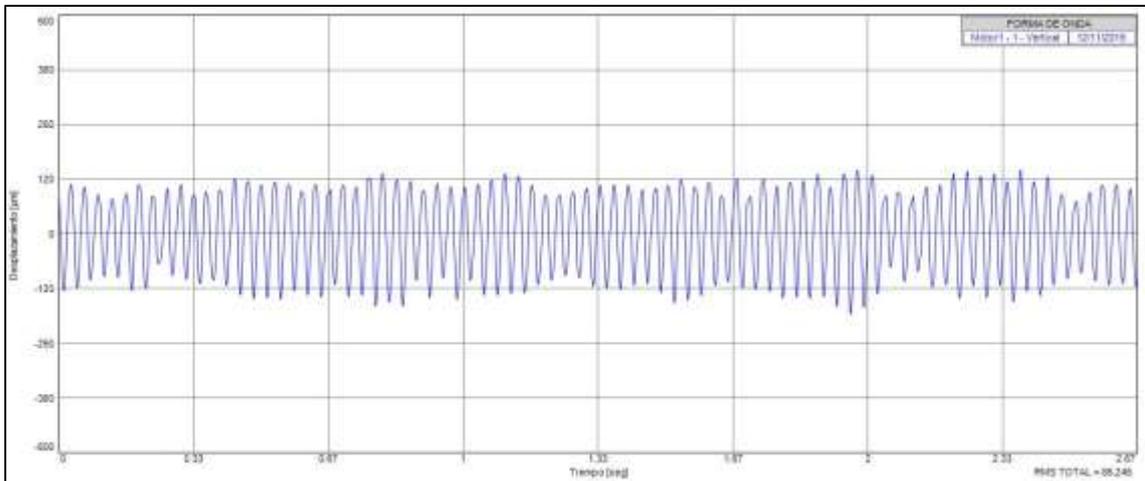
En las figuras 4-3 y 5-3 se observa las formas de ondas características de vibración en unidades de velocidad del punto 1, que son el resultado de la suma de vibraciones simples dando origen a una vibración compleja, estas gráficas están cargadas de mucha información, por lo cual no se

puede dar un diagnóstico a partir de las mismas. Pero se observa que las formas de onda de los dos sistemas muestran gran similitud y los valores de vibración global de aceleración de la tabla 2-3 presentan un error absoluto de 0.381 y un error relativo de 2.17 %.



**Figura 6-3:** Forma de onda del desplazamiento en el punto 1 PVA

**Realizado por:** Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019



**Figura 7-3:** Forma de onda del desplazamiento en el punto 1 VIBRAcheck

**Realizado por:** Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

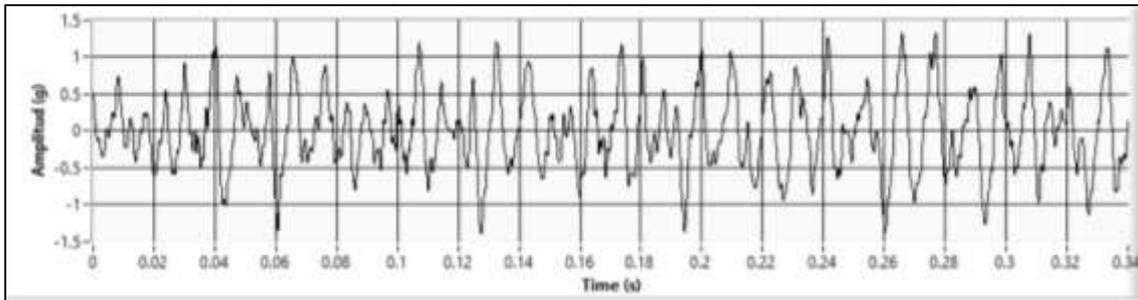
**Tabla 3-3:** Vibración global del desplazamiento en el punto 1

<b>Forma de onda del desplazamiento punto 1</b>	
<b>VIBRAcheck</b>	86.245 µm
<b>PVA</b>	87.123 µm

**Realizado por:** Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

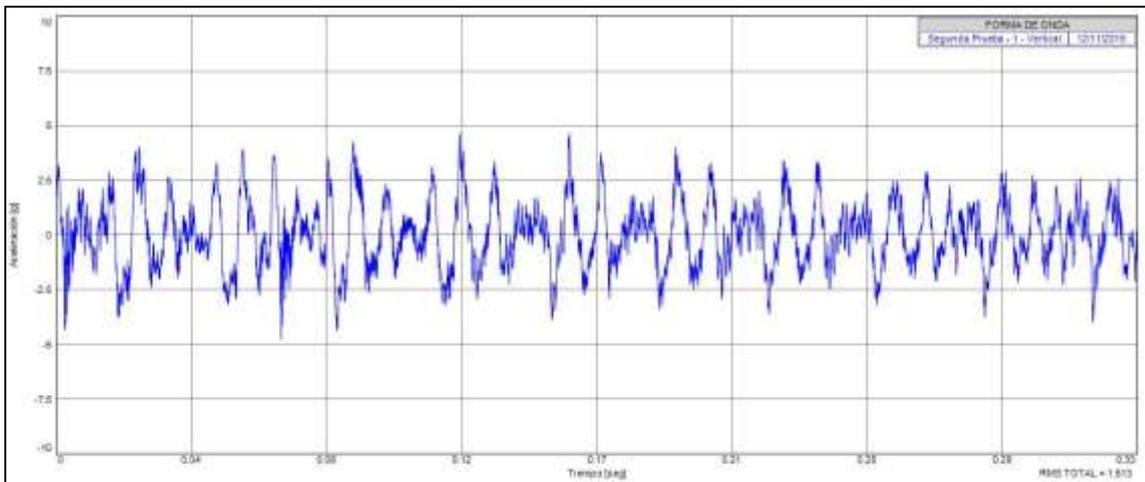
En las figuras 6-3 y 7-3 se observa las formas de ondas características de vibración en unidades de desplazamiento del punto 1, que son el resultado de la suma de vibraciones simples dando origen a una vibración compleja, estas gráficas están cargadas de mucha información, por lo cual no se puede dar un diagnóstico a partir de las mismas. Pero se observa que las formas de onda de los dos sistemas muestran gran similitud y los valores de vibración global de aceleración de la tabla 3-3 presentan un error absoluto de 0.878 y un error relativo de 1.02 %.

Ahora se procede a realizar el mismo procedimiento para el punto 2, estos resultados se muestran en las figuras 8-3 hasta 13-3 y en las tablas 4-3 hasta la 6-3.



**Figura 8-3:** Forma de onda de la aceleración en el punto 2 PVA

**Realizado por:** Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019



**Figura 9-3:** Forma de onda de la aceleración en el punto 2 VIBRAcheck

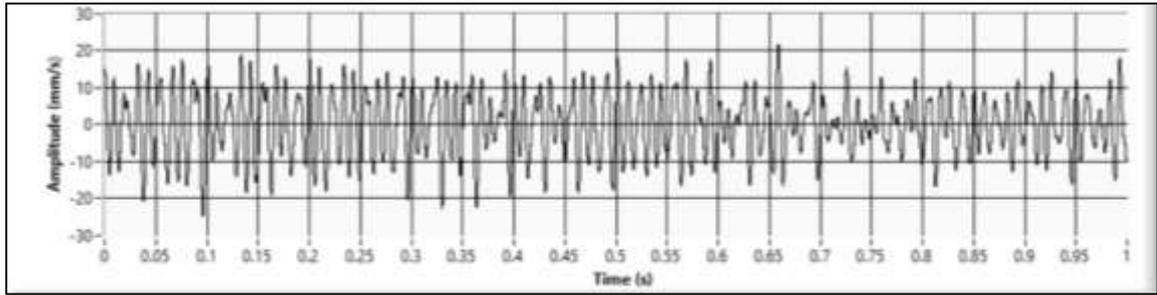
**Realizado por:** Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

**Tabla 4-3:** Vibración global de la aceleración en el punto 2

<b>Forma de onda de aceleración punto 2</b>	
<b>VIBRAcheck</b>	1.513 g
<b>PVA</b>	1.491 g

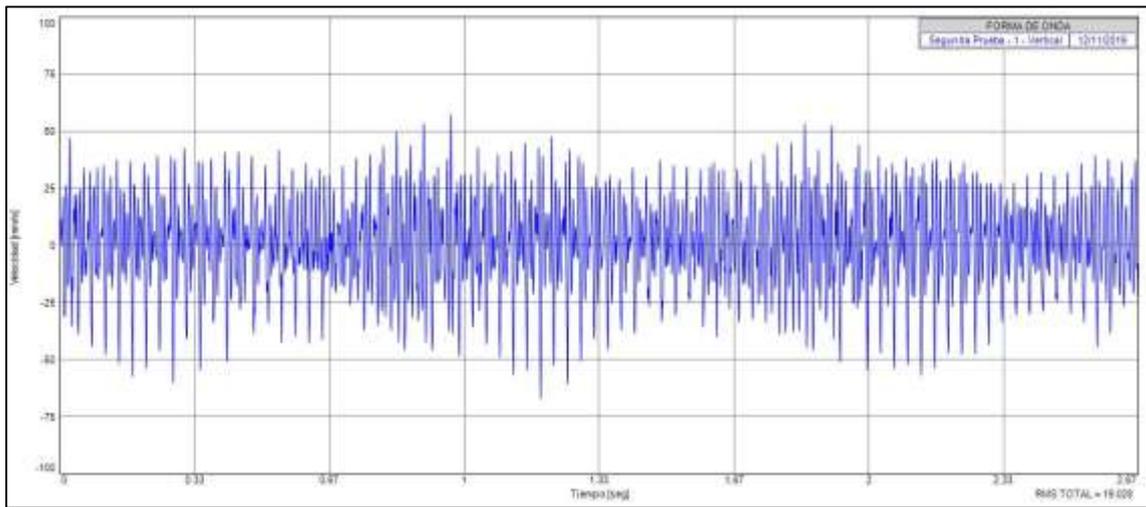
**Realizado por:** Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

En las figuras 8-3 y 9-3 se observa las formas de ondas características de vibración en unidades de aceleración del punto 2, que son el resultado de la suma de vibraciones simples dando origen a una vibración compleja, estas gráficas están cargadas de mucha información, por lo cual no se puede dar un diagnóstico a partir de las mismas. Pero se observa que las formas de onda de los dos sistemas muestran gran similitud y los valores de vibración global de aceleración de la tabla 4-3 presentan un error absoluto de 0.022 y un error relativo de 1.45 %.



**Figura 10-3:** Forma de onda de la velocidad en el punto 2 PVA

**Realizado por:** Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019



**Figura 11-3:** Forma de onda de la velocidad en el punto 2 VIBRAcheck

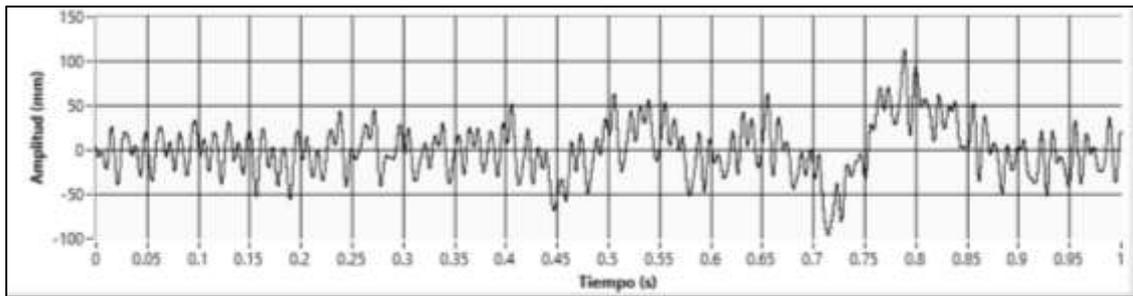
**Realizado por:** Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

**Tabla 5-3:** Vibración global de la velocidad en el punto 2

<b>Forma de onda de velocidad punto 2</b>	
<b>VIBRAcheck</b>	19.028 mm/s
<b>PVA</b>	18.867 mm/s

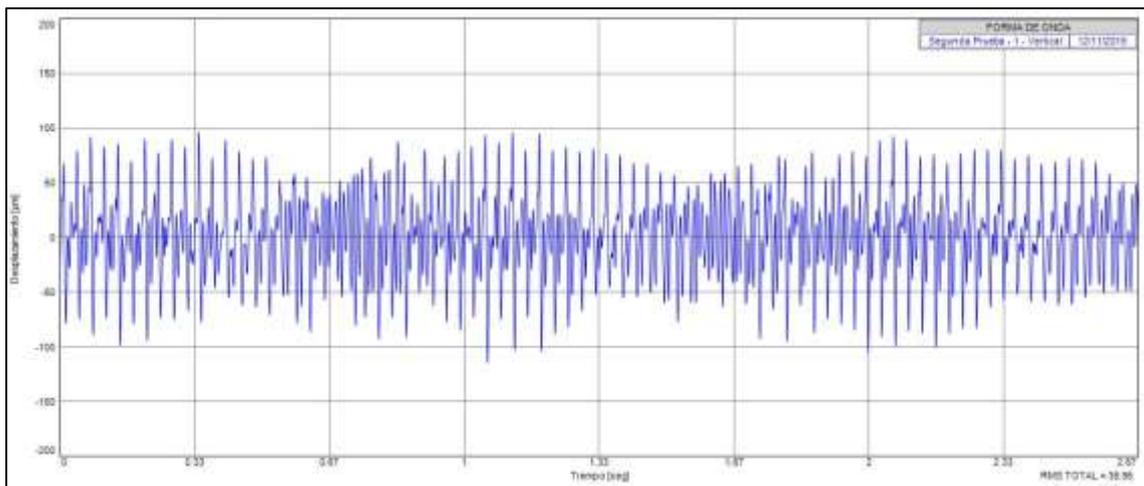
**Realizado por:** Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

En las figuras 10-3 y 11-3 se observa las formas de ondas características de vibración en unidades de velocidad del punto 2, que son el resultado de la suma de vibraciones simples dando origen a una vibración compleja, estas gráficas están cargadas de mucha información, por lo cual no se puede dar un diagnóstico a partir de las mismas. Pero se observa que las formas de onda de los dos sistemas muestran gran similitud y los valores de vibración global de aceleración de la tabla 5-3 presentan un error absoluto de 0.161 y un error relativo de 0.85 %.



**Figura 12-3:** Forma de onda del desplazamiento en el punto 2 PVA

**Realizado por:** Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019



**Figura 13-3:** Forma de onda del desplazamiento en el punto 2 VIBRAcheck

**Realizado por:** Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

**Tabla 6-3:** Vibración global del desplazamiento en el punto 2

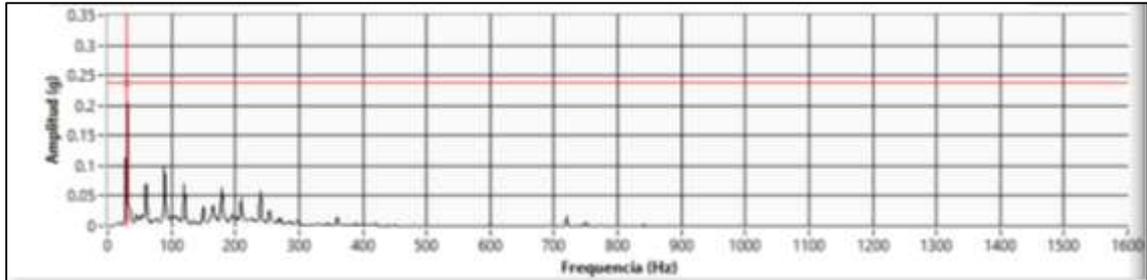
<b>Forma de onda del desplazamiento punto 2</b>	
<b>VIBRAcheck</b>	35.950 $\mu\text{m}$
<b>PVA</b>	36.224 $\mu\text{m}$

**Realizado por:** Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

En las figuras 12-3 y 13-3 se observa las formas de ondas características de vibración en unidades de desplazamiento del punto 2, que son el resultado de la suma de vibraciones simples dando origen a una vibración compleja, estas gráficas están cargadas de mucha información, por lo cual no se puede dar un diagnóstico a partir de las mismas. Pero se observa que las formas de onda de los dos sistemas muestran gran similitud y los valores de vibración global de aceleración de la tabla 6-3 presentan un error absoluto de 0.274 y un error relativo de 0.76 %.

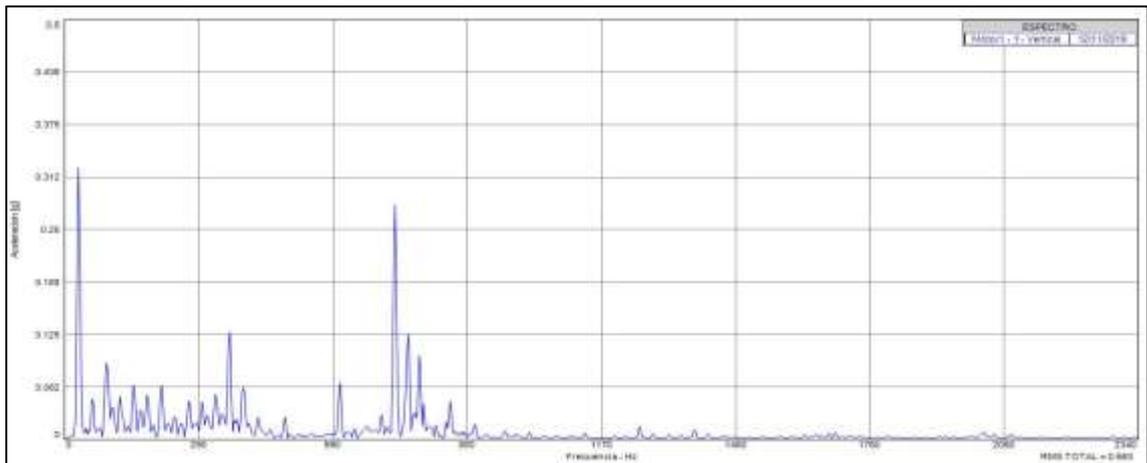
### 3.1.1.2 Comparación espectros

En las figuras 14-3 hasta 19-3 corresponde a los espectros obtenidos del punto 1 y las tablas 7-3 hasta 9-3, presentan los armónicos generados con sus respectivas amplitudes y frecuencias.



**Figura 14-3:** Espectro de la aceleración en el punto 1 PVA

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019



**Figura 15-3:** Espectro de la aceleración en el punto 1 VIBRAcheck

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

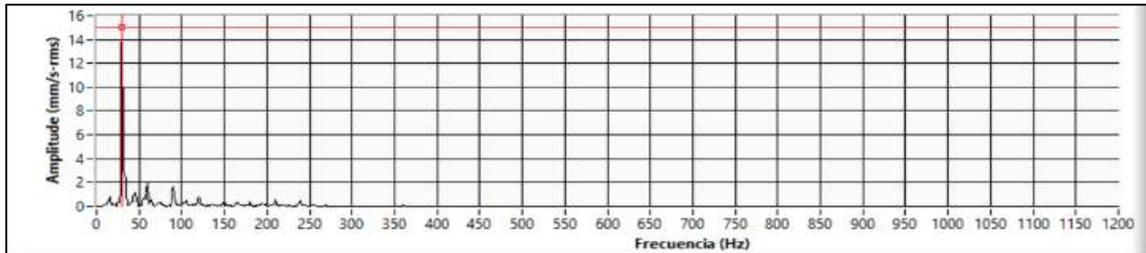
**Tabla 7-3:** Amplitudes y frecuencias de los espectros en aceleración en el punto 1

Espectro Aceleración en el punto 1			
VIBRAcheck		PVA	
Frecuencia (Hz)	Amplitud (g)	Frecuencia (Hz)	Amplitud (g)
29.306	0.323	29.205	0.312
58.612	0.047	58.487	0.041
87.918	0.067	86.889	0.059

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

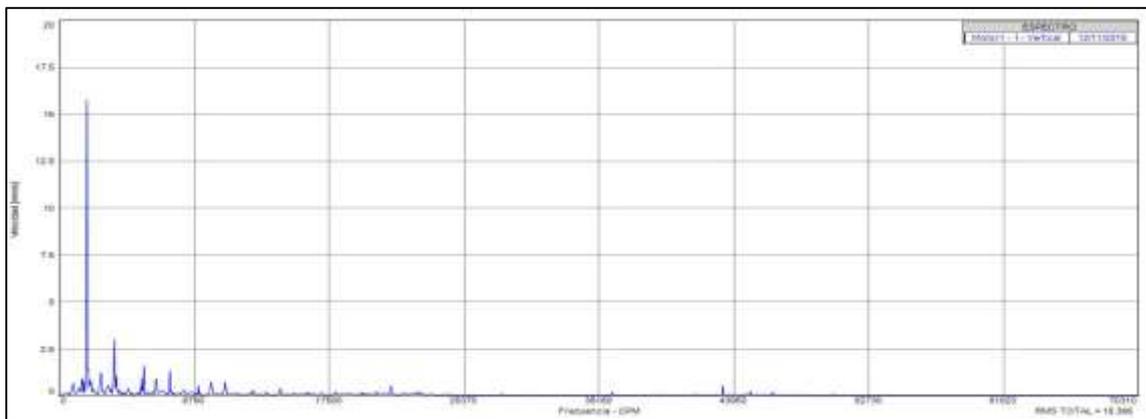
En las figuras 14-3 y 15-3 se observa los espectros característicos de vibración, a partir de los espectros se puede realizar un diagnóstico para valores de frecuencias altas (por encima de 60 000

cpm), los cuales no se ajustan a los valores de frecuencia del banco de pruebas propuesto. Pero se observa que los espectros de los dos sistemas y los valores de amplitud, frecuencia de cada armónico en unidades de aceleración del punto 1 de la tabla 7-3, muestran gran similitud.



**Figura 16-3:** Espectro de la velocidad en el punto 1 PVA

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019



**Figura 17-3:** Espectro de la velocidad en el punto 1 VIBRAcheck

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

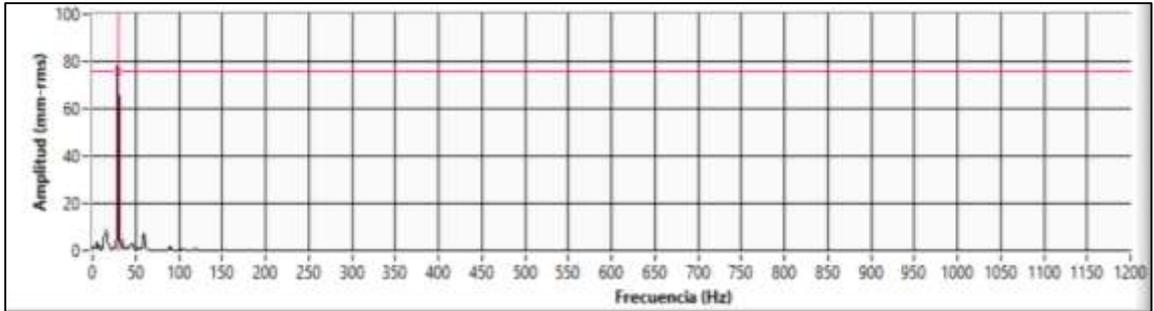
**Tabla 8-3:** Amplitudes y frecuencias de los espectros en velocidad en el punto 1

<b>Espectro Velocidad en el punto 1</b>			
<b>VIBRAcheck</b>		<b>PVA</b>	
<b>Frecuencia (Hz)</b>	<b>Amplitud (mm/s)</b>	<b>Frecuencia (Hz)</b>	<b>Amplitud (mm/s)</b>
29.841	15.754	29.960	15.215
59.682	2.975	59.921	2.889
89.523	0.896	89.881	0.863

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

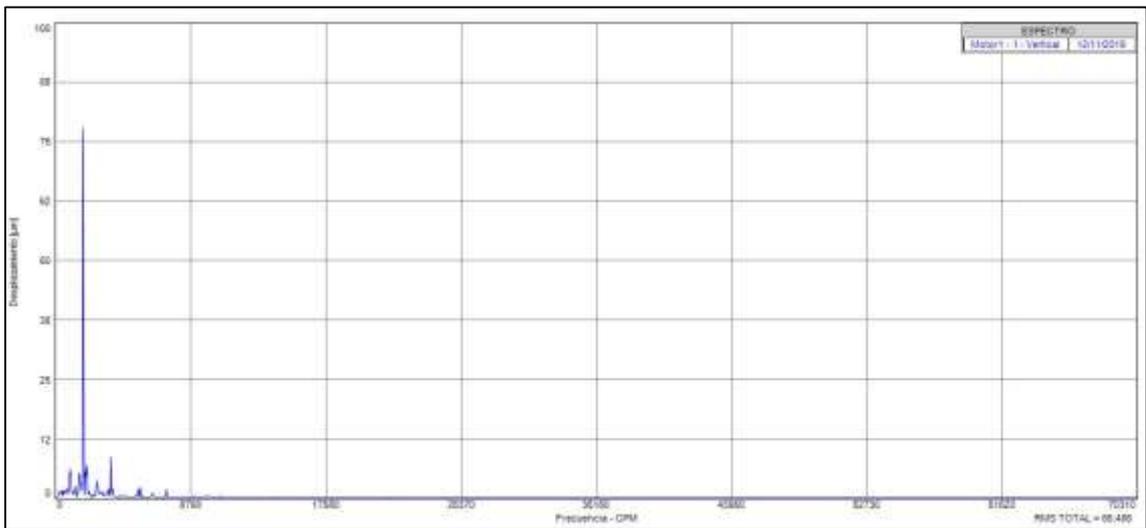
En las figuras 16-3 y 17-3 se observa los espectros característicos de vibración, a partir de los espectros se puede realizar un diagnóstico para valores de frecuencias de rango mediado (entre 600 a 60 000 cpm), los cuales se ajustan a los valores de frecuencia del banco de pruebas propuesto. El respectivo diagnóstico se realiza en la tabla 15-3. Se observa que los espectros de

los dos sistemas y los valores de amplitud, frecuencia de cada armónico en unidades de velocidad del punto 1 de la tabla 8-3, muestran gran similitud.



**Figura 18-3:** Espectro de desplazamiento en el punto 1 PVA

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019



**Figura 19-3:** Espectro de desplazamiento en el punto 1 VIBRAcheck

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

**Tabla 9-3:** Amplitudes y frecuencias de los espectros en desplazamiento en el punto 1

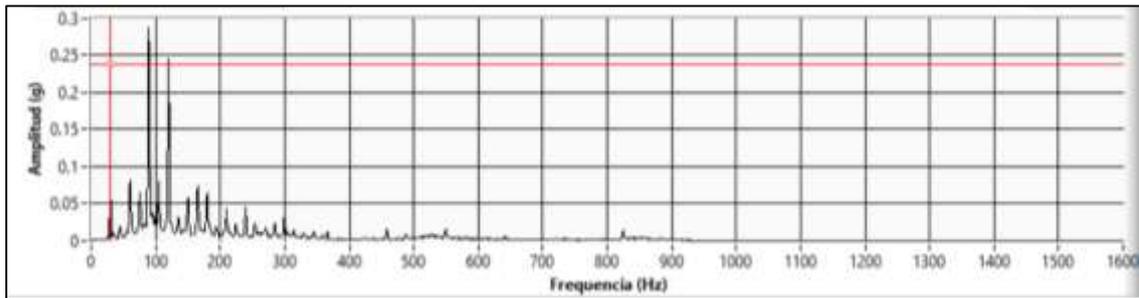
<b>Espectro Desplazamiento en el punto 1</b>			
<b>VIBRAcheck</b>		<b>PVA</b>	
<b>Frecuencia (Hz)</b>	<b>Amplitud (µm)</b>	<b>Frecuencia (Hz)</b>	<b>Amplitud (µm)</b>
29.672	77.573	29.651	77.213
59.345	5.820	59.338	5.765
89.017	0.831	88.987	0.768

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

En las figuras 18-3 y 19-3 se observa los espectros característicos de vibración, a partir de los espectros se puede realizar un diagnóstico para valores de frecuencias bajas (por debajo de 600

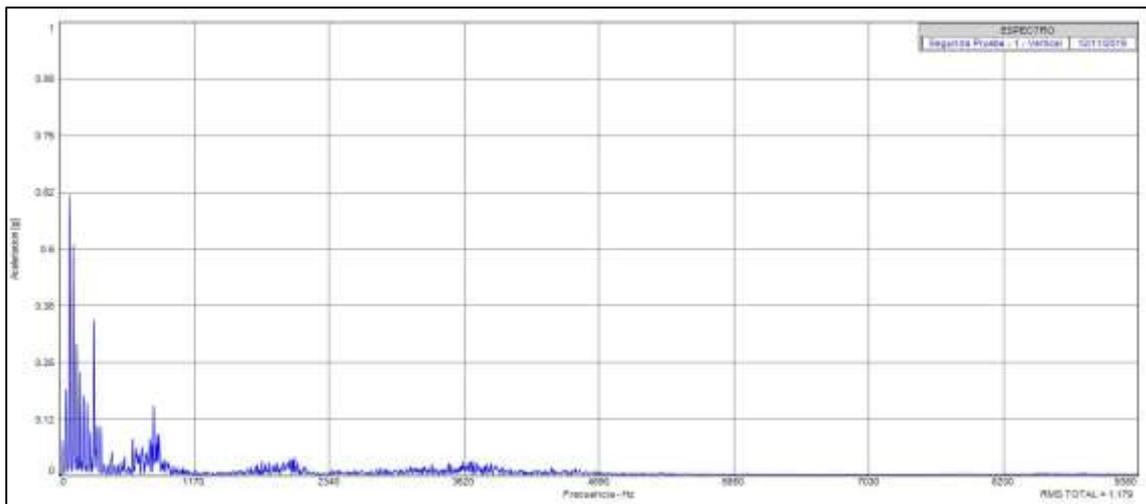
cpm), los cuales no se ajustan a los valores de frecuencia del banco de pruebas propuesto. Pero se observa que los espectros de los dos sistemas y los valores de amplitud, frecuencia de cada armónico en unidades de desplazamiento del punto 1 de la tabla 9-3, muestran gran similitud.

Ahora se procede a realizar el mismo procedimiento para el punto 2, estos resultados se muestran en las figuras 20-3 hasta 25-3 y en las tablas 10-3 hasta la 12-3.



**Figura 20-3:** Espectro de la aceleración en el punto 2 PVA

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019



**Figura 21-3:** Espectro de la aceleración en el punto 2 VIBRAcheck

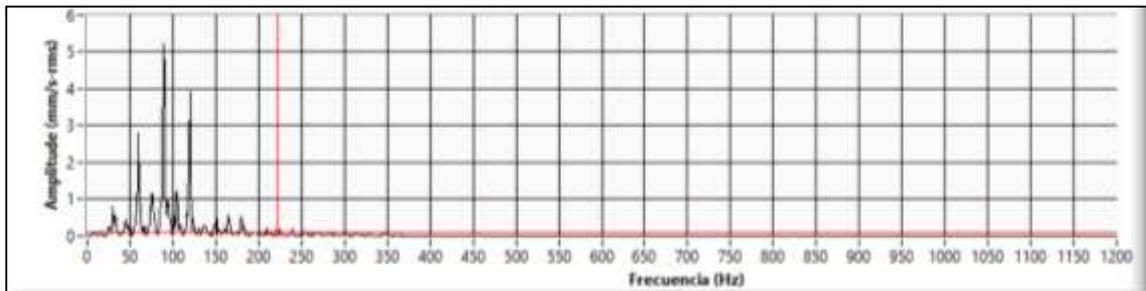
Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

**Tabla 10-3:** Amplitudes y frecuencias de los espectros en aceleración en el punto 2

<b>Espectro Aceleración en el punto 1</b>			
<b>VIBRAcheck</b>		<b>PVA</b>	
<b>Frecuencia (Hz)</b>	<b>Amplitud (g)</b>	<b>Frecuencia (Hz)</b>	<b>Amplitud (g)</b>
30.375	0.077	30.214	0.067
60.749	0.189	60.547	0.169
91.124	0.616	90.899	0.574

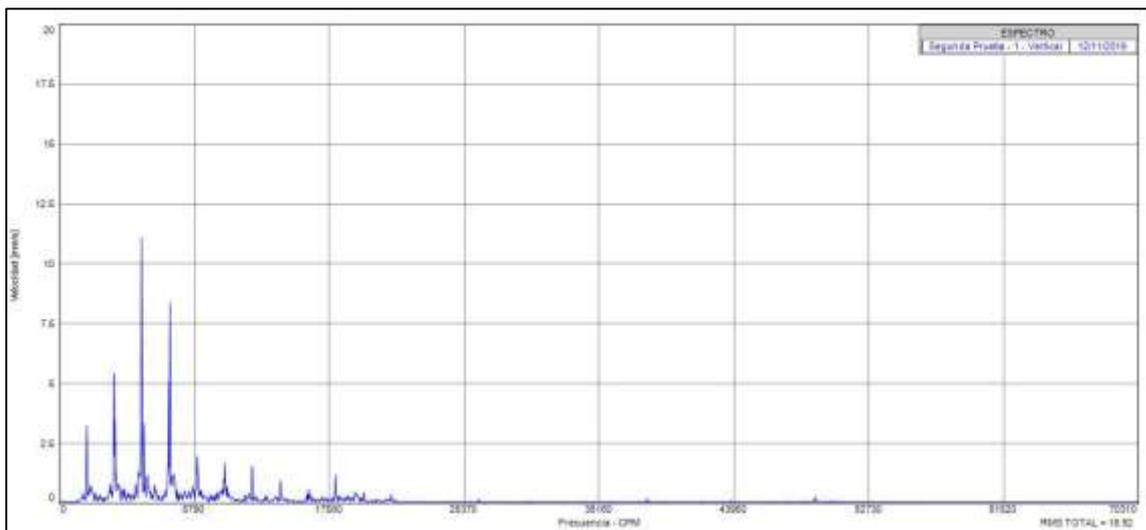
Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

En las figuras 20-3 y 21-3 se observa los espectros característicos de vibración, a partir de los espectros se puede realizar un diagnóstico para valores de frecuencias altas (por encima de 60 000 cpm), los cuales no se ajustan a los valores de frecuencia del banco de pruebas propuesto. Pero se observa que los espectros de los dos sistemas y los valores de amplitud, frecuencia de cada armónico en unidades de aceleración del punto 2 de la tabla 10-3, muestran gran similitud.



**Figura 22-3:** Espectro de la velocidad en el punto 2 PVA

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019



**Figura 23-3:** Espectro de la velocidad en el punto 2 VIBRAcheck

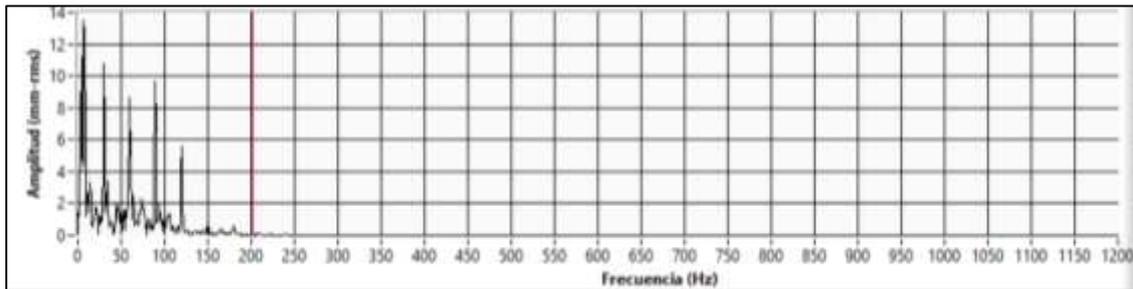
Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

**Tabla 11-3:** Amplitudes y frecuencias de los espectros en velocidad en el punto 2

<b>Espectro Velocidad en el punto 2</b>			
<b>VIBRAcheck</b>		<b>PVA</b>	
<b>Frecuencia (Hz)</b>	<b>Amplitud (mm/s)</b>	<b>Frecuencia (Hz)</b>	<b>Amplitud (mm/s)</b>
29.799	3.211	29.726	3.143
59.599	5.207	59.452	5.185
89.398	11.070	89.178	10.989

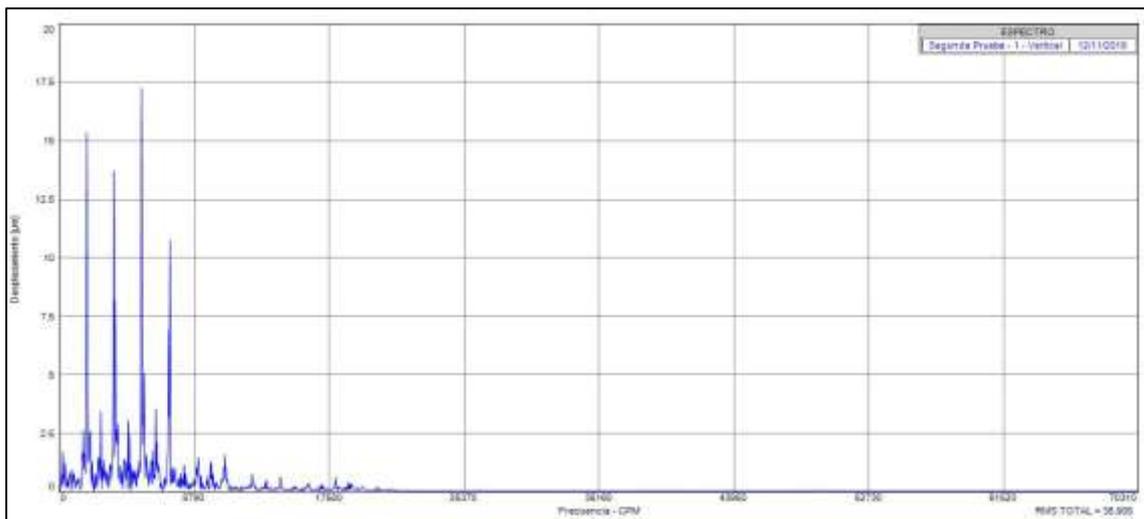
Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

En las figuras 22-3 y 23-3 se observa los espectros característicos de vibración, a partir de los espectros se puede realizar un diagnóstico para valores de frecuencias de rango mediado (entre 600 a 60 000 cpm), los cuales se ajustan a los valores de frecuencia del banco de pruebas propuesto. El respectivo diagnóstico se realiza en la tabla 15-3. Se observa que los espectros de los dos sistemas y los valores de amplitud, frecuencia de cada armónico en unidades de velocidad del punto 2 de la tabla 11-3, muestran gran similitud.



**Figura 24-3:** Espectro del desplazamiento en el punto 2 PVA

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019



**Figura 25-3:** Espectro de desplazamiento en el punto 2 VIBRAcheck

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

**Tabla 12-3:** Amplitudes y frecuencias de los espectros en desplazamiento en el punto 2

<b>Espectro Desplazamiento en el punto 2</b>			
<b>VIBRAcheck</b>		<b>PVA</b>	
<b>Frecuencia (Hz)</b>	<b>Amplitud (µm)</b>	<b>Frecuencia (Hz)</b>	<b>Amplitud (µm)</b>
29.806	15.305	29.789	15.214
59.611	11.792	59.596	11.564
89.417	17.217	89.387	17.101

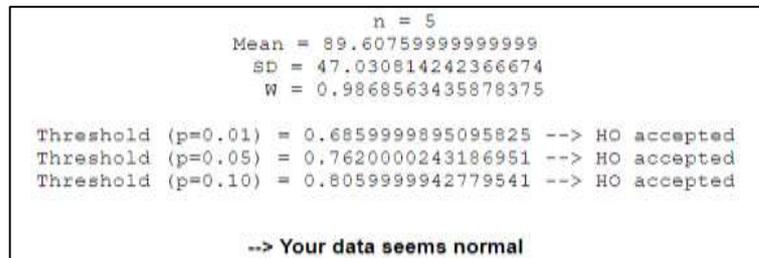
Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

En las figuras 24-3 y 25-3 se observa los espectros característicos de vibración, a partir de los espectros se puede realizar un diagnóstico para valores de frecuencias bajas (por debajo de 600 cpm), los cuales no se ajustan a los valores de frecuencia del banco de pruebas propuesto. Pero se observa que los espectros de los dos sistemas y los valores de amplitud, frecuencia de cada armónico en unidades de desplazamiento del punto 2 de la tabla 12-3, muestran gran similitud.

### 3.1.2 Prueba estadística de datos para validación del sistema

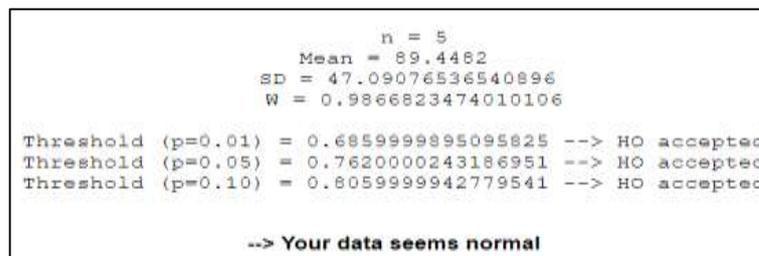
Se aplica la prueba estadística T-Student de dos muestras independientes suponiendo varianzas desiguales a dos colas, esta prueba se utilizó debido a que los datos siguen una distribución normal como se muestra en las figuras 26-3 a 29-3, realizado en Shapiro wilk test, son muestras de equipos diferentes y se quiere conocer que no existe una diferencia significativa de las medias entre los dos equipos. Esto se realiza a partir de los valores obtenidos de frecuencia en los puntos 1 y 2 como se observa en la figura 1-3, en unidades de velocidad tomadas por los dos equipos, esto se debe a que en cualquier sistema los valores de amplitud pueden variar, pero los valores de frecuencias no varían.

- **Nivel de confianza:** 95%
- **Probabilidad de error ( $\alpha$ ):** 0.05
- **Pruebas de normalidad:**



**Figura 26-3:** Prueba de normalidad PVA punto 1

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019



**Figura 27-3:** Prueba de normalidad VIBRAcheck punto 1

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

```

n = 5
Mean = 89.3676
SD = 47.21135424132631
W = 0.9860033594492257

Threshold (p=0.01) = 0.6859999895095825 --> HO accepted
Threshold (p=0.05) = 0.7620000243186951 --> HO accepted
Threshold (p=0.10) = 0.8059999942779541 --> HO accepted

--> Your data seems normal

```

**Figura 28-3:** Prueba de normalidad PVA punto 2

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

```

n = 5
Mean = 89.39779999999999
SD = 47.117146578501554
W = 0.9865881386134241

Threshold (p=0.01) = 0.6859999895095825 --> HO accepted
Threshold (p=0.05) = 0.7620000243186951 --> HO accepted
Threshold (p=0.10) = 0.8059999942779541 --> HO accepted

--> Your data seems normal

```

**Figura 29-3:** Prueba de normalidad VIBRAcheck punto 2

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

Dicho esto, se plantea la siguiente hipótesis:

**Ho:** Los valores de frecuencia obtenidos del espectro de velocidad en el sistema PVA y VIBRAcheck no presentan diferencias numéricas significativas.

**H1:** Los valores de frecuencia obtenidos del espectro de velocidad en el sistema PVA y VIBRAcheck presentan diferencias numéricas significativas.

**Tabla 13-3:** Prueba t- Student Espectro de velocidad Punto 1

Espectro de velocidad punto 1		
Frecuencia Espectral	Frecuencia [Hz]	
Espectro	PVA	Vibracheck
1X	29.961	29.841
2X	59.921	59.682
3X	89.881	89.523
4X	119.264	119.198
5X	149.012	148.997
Estadísticas	PVA	Vibracheck
Media	89.6078	89.4482
Varianza	2211.867665	2217.540183
Observaciones	5	5
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	8	
Estadístico t	0.005362225	
P(T<=t) una cola	0.497926444	
Valor crítico de t (una cola)	1.859548038	
P(T<=t) dos colas	0.995852888	
Valor crítico de t (dos colas)	2.306004135	

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

**Tabla 14-3:** Prueba t- Student Espectro de velocidad Punto 2

<b>Espectro de velocidad punto 2</b>		
<b>Frecuencia Espectral</b>	<b>Frecuencia [Hz]</b>	
<b>Espectro</b>	<b>PVA</b>	<b>Vibracheck</b>
1X	29.726	29.799
2X	59.452	59.599
3X	89.179	89.396
4X	119.469	119.198
5X	149.012	148.997
<b>Estadísticas</b>	<b>PVA</b>	<b>Vibracheck</b>
Media	89.3676	89.3978
Varianza	2228.911969	2220.025502
Observaciones	5	5
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	8	
Estadístico t	-0.001012427	
P(T<=t) una cola	0.499608495	
Valor crítico de t (una cola)	1.859548038	
P(T<=t) dos colas	0.999216991	
Valor crítico de t (dos colas)	2.306004135	

**Realizado por:** Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

Las tablas 13-3, 14-3 nos proporcionan los valores del análisis de la prueba de t-Student realizada a los niveles de frecuencias del espectro de velocidad en el punto 1 y 2, dando como resultado que el valor p-value (probabilidad del estadístico) a dos colas es mayor que el nivel de confianza de 0,5 en los dos casos. Se acepta  $H_0$  lo que demuestra que no existe diferencia significativa entre las medias, de las frecuencias medidas por los dos sistemas, obteniendo que el sistema PVA es factible.

### 3.2 Prueba de recepción de mensajes de los niveles de severidad del sistema

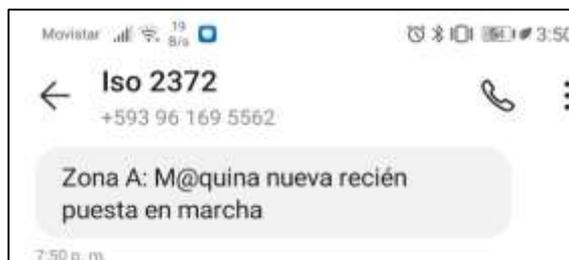
El objetivo de la prueba es determinar que los mensajes de alerta de la severidad de la vibración se emitan cuando el sistema PVA detecte los cambios en los niveles de vibración global de la velocidad.

En la figura 30-3 se muestra los resultados cuando la evaluación de severidad se encuentra en la Zona A, debido a que el nivel de vibración se encuentra dentro de ese rango establecido por la Norma ISO 2372, esto se muestra en un indicador en forma de texto y en un indicador visual, pero a la par en la figura 31-3 se observa la recepción del mensaje indicando que el sistema se encuentra en la Zona A y el significado de la misma.



**Figura 30-3:** Evaluación de severidad Zona A

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019



**Figura 31-3:** Mensaje de alerta Zona A

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

Mientras tanto en la figura 32-3 se muestra que el sistema se encuentra en la Zona B, debido a que se le sometió al sistema a una mayor vibración la cual se encuentra en los límites máximos establecidos en la norma. Y como es de esperarse en la figura 33-3 se muestra la recepción del mensaje de alerta indicando la zona en la cual se encuentra el sistema.



**Figura 32-3:** Evaluación de severidad Zona D

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019



**Figura 33-3:** Mensaje de alerta Zona D

**Realizado por:** Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

### 3.3 Elaboración del plan de mantenimiento

En el siguiente apartado se desarrolla un plan de mantenimiento predictivo a través de los espectros obtenidos de las mediciones realizadas en el sistema, el cual contendrá el diagnóstico de las fallas más comunes presentes en los sistemas y las acciones a realizarse cuando se presenten los mismos.

#### 3.3.1 Selección de las frecuencias de inspección

Para planificar los intervalos de inspección se debe tomar en cuenta los criterios de clasificación de la máquina, los siguientes puntos son recomendaciones, aunque cada empresa puede fijar el lapso que considere adecuado.

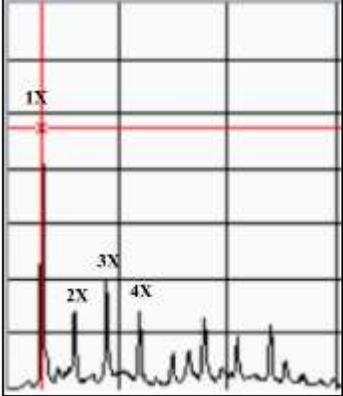
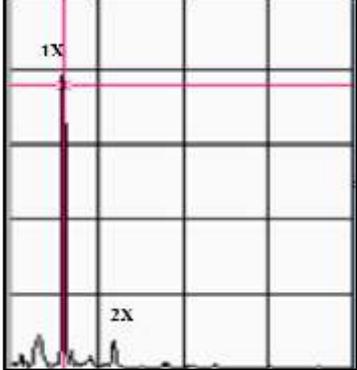
- Si la historia de operación es buena la inspección es trimestral.
- Si la maquinaria es altamente confiable los intervalos pueden ser de 6 a 12 meses.
- Equipo vital sin respaldo puede evaluarse cada 1 o 2 semanas.
- Equipo no vital con respaldo se evalúa trimestralmente.
- Equipo no vital operado intermitentemente se puede monitorear trimestral o semestralmente.

En base a lo anterior, el sistema de análisis de vibraciones puede acoplarse para la selección de frecuencias de inspección que requiera el equipo.

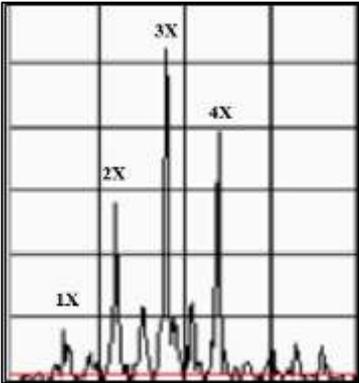
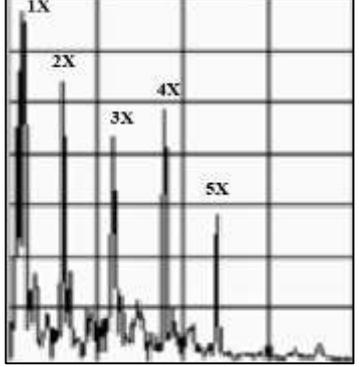
#### 3.3.2 Reporte de análisis vibracional

En la tabla 15-3 se muestra el reporte de los espectros encontrados al momento de realizar las mediciones, por ende, se detalla su diagnóstico y recomendación para eliminar estas fallas.

**Tabla 15-3:** Reporte de análisis de vibraciones

Espectro de velocidad	Análisis	Diagnóstico	Recomendación
 <p data-bbox="199 794 642 879">Espectro de velocidad del punto 1, figura 16-3.</p>	<p data-bbox="663 376 1104 451">La vibración RMS total registrada se encuentra en la Zona A.</p>	<p data-bbox="1126 376 1568 560">Se observa que la amplitud de 1X es menor y los picos de amplitudes de los armónicos son bajas esto indica que la máquina está en buen estado.</p>	<ul data-bbox="1590 376 2033 504" style="list-style-type: none"> <li>- Realizar una limpieza de los elementos que componen el sistema.</li> </ul>
 <p data-bbox="199 1295 642 1380">Espectro de velocidad del punto 1, figura 16-3.</p>	<p data-bbox="663 903 1104 978">La vibración RMS total registrada se encuentra en la Zona B.</p>	<p data-bbox="1126 903 1568 1134">Se observa que la amplitud de 1X es mayor que las demás, indicando que se está iniciando una falla por desbalanceo, además puede presentar una falla por holgura mecánica.</p>	<ul data-bbox="1590 903 2033 1078" style="list-style-type: none"> <li>- Ajustar los puntos de anclaje del sistema.</li> <li>- Equilibrar la masa la cual esta acoplada al sistema.</li> </ul> <p data-bbox="1868 1318 2033 1350" style="text-align: right;">Continuación</p>

Continuación tabla 15-3

 <p>Espectro de velocidad del punto 2, figura 22-3.</p>	<p>La vibración RMS total registrada se encuentra en la Zona C.</p>	<p>Se observa que la amplitud de 1X es menor que la amplitud de 2X, esto se refiere a una desalineación, además se observa picos de amplitud altos en 4X lo que hace referencia que la desalineación es severa y está relacionado con una excentricidad en el rotor.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cambio de los elementos del acople.</li> <li>- Cambio de rodamientos.</li> <li>- La excentricidad es una falla de fabricación, si el valor de amplitud es grande pedir la garantía del equipo.</li> </ul>
 <p>Espectro de velocidad del punto 2, figura 22-3.</p>	<p>La vibración RMS total registrada se encuentra en la Zona D.</p>	<p>Se observa que los picos de amplitud de los armónicos son altos en 1X-5X lo que asocia que el estado de los elementos de la máquina es crítico, como son rodamientos, acoples, anclaje y que la máquina no puede trabajar.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mantenimiento a todos los elementos del sistema.</li> <li>- Cambio de los elementos del acople.</li> <li>- Cambio de rodamientos.</li> <li>- Sujeción de elementos de anclaje.</li> </ul>

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

El primer armónico 1X está asociado con la velocidad del motor, este armónico puede estar asociado a defectos de desbalanceo, soltura estructural. Tenemos otro espectro característico el cual está asociado con el doble de la frecuencia de la red este se debe a la presencia de excentricidad en el rotor y a partir de la amplitud se determina la severidad de estas, esto se establece en las cartas de Charlotte.

### 3.4 Consumo de energía del sistema PVA

En esta prueba se realiza un análisis del consumo de potencia anual que el sistema demanda para su funcionamiento, para realizar esto se utiliza la ecuación 1-3 la cual nos sirve para determinar la potencia.

**Ecuación 1-3:** Calculo de potencia

$$P = V * I$$

En donde:

**P:** Potencia (W)

**V:** Voltaje (V)

**I:** Corriente (A)

En la tabla 16-3 muestra los valores de potencia que consume los elementos que componen el sistema.

**Tabla 16-3:** Consumo de potencia del sistema

Componente	Potencia (W)
DAQ	2.5
ADXL355	0.00175
PLC	6
<b>Total (h)</b>	<b>8.5</b>
<b>Total (día)</b>	<b>204</b>

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

Los resultados dan una potencia de 8.5 W/h, en el día tendría un consumo de 0.204 kW/h. Esto indica que el sistema de análisis vibracional tiene una demanda de energía baja.

### 3.5 Análisis de costos

En la tabla 17-3 se indica el costo total del trabajo de titulación incluido el banco de pruebas, software y equipo utilizado para el procesamiento. El cual será financiado por los proponentes del sistema.

**Tabla 17-3:** Costo del Sistema de Análisis Vibracional

<b>Componentes</b>	<b>Costo (USD)</b>
<b>Electrónicos</b>	\$ 623
<b>Software*</b>	\$ 3465
<b>Computador</b>	\$ 1500
<b>Eléctricos</b>	\$ 70
<b>Mecánicos</b>	\$ 367
<b>Otros</b>	\$ 20
<b>Total</b>	<b>\$ 6045</b>

Realizado por: Fernández, Luis; Toapanta, Jefferson, 2019

\* Dentro del costo del software, se considera un valor estándar de la licencia completa LabVIEW, sin embargo, para este proyecto se utiliza las licencias institucionales lo cual involucra un menor costo al mencionado.

## CONCLUSIONES

- Mediante la revisión de los equipos VIBRAcheck 200, VSA 002 y A4900 Vibrio M, se determinó que cumplen con la norma de análisis vibracional, midiendo los niveles de vibración en las diferentes unidades, utilizando la velocidad para aplicar la norma ISO 2372 para establecer la severidad de la vibración. Además, una desventaja en común es que no permiten realizar un monitoreo continuo. Sin embargo, los equipos VIBRAcheck y VSA 002 permiten la visualización de las formas de ondas y espectros para conocer el origen de las fallas en motores eléctricos.
- Los analizadores de vibraciones actuales carecen del envío de alertas de la severidad de los niveles de vibración a un dispositivo móvil, por lo cual se implementó un sistema de comunicación GSM utilizando un PLC para realizar el envío de estas alertas, lo que permitirá a los encargados tener un control del estado del nivel de vibración del motor sin estar verificando continuamente los niveles en el HMI.
- Los instrumentos empleados para la adquisición de vibración, módulo DAQ NI USB-6009, brindó una prestación alta del tiempo de muestreo, lo cual, permitió que no haya pérdida de información y el acelerómetro ADXL 335, mediante la obtención de la ecuación característica se demostró que tiene un comportamiento lineal, lo cual hace referencia a que los datos proporcionado por el sensor son reales durante la medición de la vibración.
- Se determinó que el sistema desarrollado en LabVIEW llamado Predictive Vibration Analysis (PVA), fue capaz de representar la vibración medida en formas de ondas y espectros en las unidades de aceleración, velocidad y desplazamiento, las cuales fueron comparadas a través de un análisis visual y estadístico con el equipo VIBRAcheck 200. A partir de los valores globales de vibración se obtuvieron errores relativos menores al 2% y respecto a los componentes frecuenciales se encontró que no existe diferencia significativa entre las medias de los dos equipos, por tanto, se validó que el sistema es óptimo.
- Se efectuó una monitorización por medio del análisis vibracional para detectar problemas en motores eléctricos, el cual consiste en el diagnóstico de los espectros para determinar el tipo de falla presente de acuerdo con lo establecido en las cartas de Charlotte y en base a los niveles de vibración, se establece la severidad, con el fin de evaluar el estado del motor.

## RECOMENDACIONES

- Usar el sistema implementado como alternativa en los procesos de diagnóstico y elaboración de planes de mantenimiento en motores eléctricos.
- El instrumento de medición no debe estar cerca de ninguna fuente de alimentación, ya que esto agrega ruido a la señal de vibración provocando mediciones erróneas.
- Se recomienda realizar un banco de pruebas, el cual debe ser montado sobre una superficie rígida para no introducir vibraciones propias del sistema.
- Con el fin de obtener un diagnóstico más amplio de las fallas presentes en la maquinaria se puede incluir el análisis de la envolvente y colocar más puntos en los diferentes sentidos de medición.
- Para reducir el error durante el proceso de integración en la obtención de velocidad y desplazamiento, se debe tomar en cuenta un proceso de filtrado pasa alto para eliminar las componentes DC de la señal, la cual está asociada con la constante inicial de integración Offset.
- Para tener medidas confiables del sistema PVA, este debe ser comparado con un equipo certificado, el cual tenga una trazabilidad confirmada de acuerdo con lo dispuesto por su fabricante o laboratorio de certificaciones.

## BIBLIOGRAFÍA

**ACOSTA, D., & MOLINA, J.** “*Adquisición de vibraciones mecánicas de un motor en funcionamiento usando LabVIEW*” (tesis). (pregrado). Escuela Superior Politécnica del Litoral de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador, 2011. pp. 11-14. [Consulta: 9 de septiembre de 2019]. Disponible en: <<http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/19459>>.

**ALDAZ, L.** “*Análisis espectral de señales de vibraciones mecánicas causadas por desalineación como método de mantenimiento predictivo en bombas hidráulicas centrifugas horizontales de flujo radial de 1 hp*” (tesis). (pregrado). Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador, 2015. pp. 1-5. [Consulta: 23 de octubre de 2019]. Disponible en: <<https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/10374>>.

**ALVAREZ, C., & HERNÁNDEZ, W.** “*Implementación de una red GSM para monitoreo de variables eléctricas en un banco de variadores de frecuencia en el laboratorio de control y manipulación automática de la escuela de ingeniería de mantenimiento*” (tesis). (pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 2019. pp. 7 [Consulta: 24 de octubre de 2019]. Disponible en: <<http://dspace.esepoch.edu.ec/bitstream/123456789/11574/1/25T00357.pdf>>.

**A-MAQ S.A.** ANÁLISIS DE MAQUINARIA. [En línea] 2005. Disponible en: <[http://www.mantenimientoplanificado.com/articulos%20PREDICTIVO\\_archivos/CURSO%20A%20MAQ.COM.pdf](http://www.mantenimientoplanificado.com/articulos%20PREDICTIVO_archivos/CURSO%20A%20MAQ.COM.pdf)>.

**ANALOG DEVICE.** ADXL 335 ACELERÓMETRO. [En línea] 2010. [Consulta: 25 de octubre de 2019]. Disponible en: <<https://www.mouser.com/datasheet/2/609/ADXL335-1503897.pdf>>.

**ANGULO, K., & SALAZAR, J.** “*Diseño y construcción de un equipo de laboratorio para estudiar vibraciones mecánicas en sistemas rotativos para el laboratorio de mecanismos y vibraciones del DECEM de la Escuela Politécnica del Ejército*” (tesis). (pregrado). Escuela Politécnica del Ejército, Quito, Ecuador, 2013. pp. 10-13 [Consulta: 10 de septiembre de 2019]. Disponible en: <<http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/7946>>.

**BERRY, J.** Mantenimiento predictivo y análisis de señales de vibración I, USA: Editorial Technical Associates of Charlotte, 2010. Vol. Cuarta edición. pp. 1-96.

**BOHÓRQUEZ, A., & GONZÁLEZ, G.** “*Análisis y determinación de fallas potenciales mediante espectros vibracionales en los equipos críticos de la empresa “TECNORIZO S.A.”*”

*ubicada en el parque industrial de la ciudad de Ambato*” (tesis). (pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 2013. pp. 15-16. [Consulta: 8 de septiembre de 2019]. Disponible en: <<http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/3337>>.

**CARRILO, G., & DÍAZ, H.** “*Diseño y construcción de un sistema para el monitoreo de condición de generadores sincrónicos y motores trifásicos de inducción*” (tesis). (pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2011. pp. 1-4. [Consulta: 4 de septiembre de 2019]. Disponible en: <<https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4104?mode=full>>.

**ESPINOZA, E.** “*Plan de mantenimiento para la certificación, funcionamiento y calidad de equipos médicos de cuidado crítico comercializados por la empresa corpomédica CIA LTDA*”, (tesis). (pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2014. pp. 7 [Consulta: 5 de septiembre de 2019]. Disponible en: <<https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/8699>>.

**FONSECA, F., & JÁTIVA, M.** “*Implementación de una red PROFIBUS para el control de una banda transportadora en el proceso de calentamiento y reactivación del pegamento en el caucho, mediante un sistema seguidor de temperatura y extracción de gases*” (tesis). (pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 2018. pp. 23 [Consulta: 22 de octubre de 2019]. Disponible en: <<http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/9210/1/108T0253.pdf>>.

**GUERRERO, O., GÓMEZ, L.** “Las principales fallas de motores eléctricos en Costa Rica”. Research Gate [En línea], 2011, (Costa Rica) 23(1), pp. 63-67. [Consulta: 4 de septiembre de 2019]. Disponible en: <[https://www.researchgate.net/publication/277093482\\_Las\\_principales\\_fallas\\_de\\_motores\\_electricos\\_en\\_Costa\\_Rica](https://www.researchgate.net/publication/277093482_Las_principales_fallas_de_motores_electricos_en_Costa_Rica)>.

**HUILCA, E., & SILVA, F.** “*Diseño e implementación de un sistema de diagnóstico de sensores inteligentes con el estándar Io-Link en ambientes agresivos*” (tesis). (pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 2018. pp. 48-50. [Consulta: 1 de noviembre de 2019]. Disponible en: <<http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/10811>>.

**IDEAR.** VIBRACHECK 200 ANALIZADOR DE VIBRACIONES MECÁNICAS DE DOS CANALES. [En línea] 2014. [Consulta: 2 de septiembre de 2019]. Disponible en: <<http://www.idear.net/Especificaciones/Vibracheck-200.pdf>>.

**ISO 2372, 1974.** *Vibración mecánica de máquinas con velocidad de operaciones entre 100 y 200 rev/s.*

**ISO 9001, 2015.** *Sistemas de gestión de la calidad. Requisitos.*

**ISO 10012-1, 2003.** *Sistemas de gestión de las mediciones. Requisitos para los procesos de medición y los equipos de medición.*

**JIMÉNEZ, N.** “*Análisis vibracional y alineamiento láser en los equipos de la planta de reciclaje y aprovechamiento de desechos sólidos del gobierno autónomo descentralizado del cantón Salcedo*” (tesis). (pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 2013. pp. 27. [Consulta: 6 de septiembre de 2019]. Disponible en: <<http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/3072/1/25T00206.pdf>>.

**KDF. CHUMACERA DE PISO.** [En línea] 2015. [Consulta: 26 de octubre de 2019]. Disponible en: <<http://www.ivanbohman.com.ec/wp-content/uploads/2015/12/chumaceras.pdf>>.

**LOVEJOY.** ACOPLAMIENTO ELÁSTICO TIPO L. [En línea] 2019. [Consulta: 27 de octubre de 2019]. Disponible en: <<http://www.citsa.com/dwn/PDFes/P3sp/lovejoy.pdf>>.

**MAIGUA, L., & RODRÍGUEZ, V.** “*Diseño e implementación de un sistema de monitoreo de vibraciones mecánicas en el sistema SCADA de los grupos de generación Hidroeléctrica en la central Illuchi de la empresa eléctrica de Cotopaxi ELEPCO S.A*” (tesis). (pregrado). Escuela Superior Politécnica del Ejército, Latacunga. Ecuador, 2018. pp. 8-10. [Consulta: 7 de septiembre de 2019]. Disponible en: <<http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/14706>>.

**MENDOZA, D., & MIRANDA, D.** “*Implementación de un plan de mantenimiento predictivo mediante la técnica de análisis vibracional para los motores y bombas del laboratorio de turbo maquinaria de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo*” (tesis). (pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 2014. pp. 3-25. [Consulta: 6 de septiembre de 2019]. Disponible en: <<http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/3133>>.

**MONJE, D.** “*Conceptos electrónicos en la medida de la aceleración y la vibración*” (tesis). (pregrado). Escuela Politécnica de Sevilla, Sevilla, España, 2010. pp. 3-5. [Consulta: 6 de septiembre de 2019]. Disponible en: <<https://cfp.us.es/cursos/eu/mantenimiento-de-medios-e-instalaciones-industriales/1335/>>.

**MORALES, J.** “*Análisis de vibraciones en motores eléctricos asíncronos trifásicos*” (tesis). (pregrado). Universidad de San Carlos, Guatemala, Guatemala, 2009. pp. 5-10. [Consulta: 6 de septiembre de 2019]. Disponible en: <[http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_0158\\_ME.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0158_ME.pdf)>.

**MONTERO, D., & NARVÁEZ, JHON.** “*Desarrollo de una aplicación informática para adquisición y análisis de señales de vibraciones de modos de falla mecánicos*” (tesis). (pregrado).

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 2015. pp. 5-6. [Consulta: 5 de septiembre de 2019]. Disponible en: <<http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/4205>>.

**NATIONAL INSTRUMENT.** DAQ 6008. [En línea] 2015. [Consulta: 24 de octubre de 2019]. Disponible en: <<http://www.ni.com/pdf/manuals/371303n.pdf>>.

**NATIONAL INSTRUMENT.** DAQ 6009. [En línea] 2017. [Consulta: 24 de octubre de 2019]. Disponible en: <<http://www.ni.com/pdf/manuals/375296c.pdf>>.

**OCAMPO, J.** “Sistema de bajo costo para monitoreo de disturbios de vibración en máquinas rotatorias”. Research Gate [En línea], 2013, (Honduras) 2(2), pp. 16-26. [Consulta: 8 de octubre de 2019]. Disponible en: <[https://www.researchgate.net/publication/264044452\\_SISTEMA\\_DE\\_BAJO\\_COSTO\\_PARA\\_MONITOREO\\_DE\\_DISTURBIOS\\_DE\\_VIBRACION\\_EN\\_MAQUINAS\\_ROTATORIAS](https://www.researchgate.net/publication/264044452_SISTEMA_DE_BAJO_COSTO_PARA_MONITOREO_DE_DISTURBIOS_DE_VIBRACION_EN_MAQUINAS_ROTATORIAS)>.

**OMROM, Electronics SA.** Modbus TCP. [En línea]. 2007. [Consulta: 24 de octubre de 2019]. Disponible en: <[http://www.tecnical.cat/PDF/Omron/PLC/CJ/GR\\_MODBUS\\_TCP.pdf](http://www.tecnical.cat/PDF/Omron/PLC/CJ/GR_MODBUS_TCP.pdf)>.

**PCB,** Platinum Low-cost Industrial ICP® Accelerometer 603C01 [En línea]. 2010. [Consulta: 24 de octubre de 2019]. Disponible en: <<https://www.pcb.com/industrial-sensors/platinum>>.

**POWER-MI.** MANUAL DE ANÁLISIS DE VIBRACIONES. [En línea] 2018. Disponible en: <[http://power-mi.vibration\\_manual.pages.ontraport.net](http://power-mi.vibration_manual.pages.ontraport.net)>.

**RIEVTECH.** PLC EXM-12DC-DA-RT-GWIFI. [En línea] 2014. [Consulta: 28 de octubre de 2019]. Disponible en: <[https://ijrnrxhmino5p.leadongcdn.com/attachment/7kipKBjmSRrimplkRqws77gwb3znq/EXM\\_12DC\\_.pdf](https://ijrnrxhmino5p.leadongcdn.com/attachment/7kipKBjmSRrimplkRqws77gwb3znq/EXM_12DC_.pdf)>.

**SALTOS, M., & YANCHALIQÚIN, P.** “Determinación de problemas en equipos industriales mediante análisis vibracional a través del software LabVIEW” (tesis). (pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba. Ecuador, 2013. pp. 13-26. [Consulta: 5 de septiembre de 2019]. Disponible en: <<http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/3130>>.

**WHITE, G.** Introducción al Análisis de Vibraciones, USA: Editorial Azima DLI, 2010. Vol. Primera edición. pp. 8-33.

# ANEXOS

## Anexo A: Cartas de Charlotte

**TABLA 1**  
**LISTA ILUSTRADA DE DIAGNÓSTICO DE VIBRACIONES**

FUENTE DEL PROBLEMA	ESPECTRO TÍPICO	RELACIÓN DE FASE	OBSERVACIONES
<b>DESEQUILIBRIO DE MASA</b> A. DESEQUILIBRIO ESTÁTICO	1X RADIAL		El Desequilibrio Estático estará en fase y fjo. La amplitud debida al desequilibrio se elevará a cuadrado de la velocidad de giro debajo de la primer frecuencia crítica del rotor (un incremento de velocidad de 3X = vibración más alta en 9X). 1X RPM siempre está presente y por lo general domina al espectro. Se puede corregir al colocar únicamente un peso de corrección de equilibrio en un plano en el centro de gravedad (CG) del Rotor. Debe existir una diferencia de fase de 0° aprox. entre los horizontales OB e IB, así como entre los verticales OB e IB. Además por lo general existe una diferencia de fase de 90° aprox. entre las lecturas horizontales y verticales en cada apoyo de rotor desequilibrado (±30°).
B. DESEQUILIBRIO TIPO PAR	1X RADIAL		El Desequilibrio Tipo Par origina un movimiento fuera de fase de 180° en el mismo eje. 1X RPM siempre se presenta y por lo general domina al espectro. La amplitud varía con el cuadrado de la velocidad en incremento debajo de la primera velocidad crítica del rotor. Puede causar una alta vibración axial así como radial. Para su corrección se requiere colocar pesos de equilibrio en por lo menos 2 planos. Observe que debe existir una diferencia de fase de 180° aprox. entre los horizontales OB e IB, así como entre los verticales OB e IB. Además por lo general existe una diferencia de fase de 90° aprox. entre las lecturas horizontales y verticales en cada apoyo (±30°).
C. DESEQUILIBRIO DINÁMICO	1X RADIAL		El Desequilibrio Dinámico es el más común y es una combinación de desequilibrio de estático y de par. 1X RPM domina el espectro, y raramente requiere una corrección de 2 planos. Aquí la diferencia de fase radial entre los apoyos internos y externos puede abarcar un rango de 0° a 180°. Sin embargo, la diferencia en fase de los apoyos horizontales será similar a la diferencia entre las fases verticales (±30°). Así mismo, en caso de que predomine el desequilibrio, una diferencia de fase de 90° aprox. resultará entre las lecturas horizontal y vertical de cada apoyo (±40°).
D. DESEQUILIBRIO DE ROTORES EN CANTILIBRE	1X AXIAL & RADIAL		El Desequilibrio del Rotor En Cantilibre causa 1X RPM alto en ambas direcciones axial y radial. Las lecturas axiales tienden a estar en fase mientras que las lecturas radiales pueden ser inestables. Sin embargo las diferencias de la fase horizontal coincidirán por lo general con las diferencias de fase vertical en el rotor desequilibrado (±30°). Estos rotores presentan desequilibrios estático y par. Por lo tanto, los pesos de corrección siempre tendrán que colocarse en 2 planos para contrarrestarlos.
<b>ROTOR EXCÉNTRICO</b>	1X ABANICO 1X MOTOR RADIAL		La excentricidad ocurre cuando el centro de rotación está fuera de la línea central geométrica de una polea, un engrane, un rodamiento, una armadura del motor, etc. La vibración mayor ocurre en 1X RPM del componente excéntrico en una dirección a través de las líneas centrales de los dos rotores. Las lecturas comparativas de fase horizontal y vertical por lo general difieren en 0° o en 180° (cada una de las cuales indica un movimiento rectilíneo). Con frecuencia, el intentar equilibrar los rotores excéntricos dará como resultado una reducción en la vibración en una dirección radial, pero incrementa la vibración en la otra dirección radial (dependiendo de la cantidad de excentricidad).
<b>EJES FLEXIONADOS</b>	1X AXIAL 2X		Los problemas relacionados ejes flexionados causan una vibración axial alta con diferencias de fase axial con tendencia hacia los 180° en el mismo componente de la máquina. La vibración dominante por lo general ocurre en 1X si la flexión está cerca del centro del eje, pero en 2X en caso de que la flexión esté cerca del acoplamiento. (Asegúrese de compensar las fases axiales en caso de que se haya invertido la dirección del sensor). Utilice indicadores de cartula para confirmar la flexión del eje.
<b>DESALINEACIÓN</b> A. DESALINEACIÓN ANGULAR	1X 2X 3X		La Desalineación Angular se caracteriza por una vibración axial alta, 180° fuera de fase a través del acoplamiento. Tendrá una vibración axial alta tanto en 1X como en 2X RPM. Sin embargo, no es inusual que 1X, 2X ó 3X dominen. Estos síntomas también pueden indicar problemas de acoplamiento. Una desalineación angular severa puede presentar muchas armónicas de 1X RPM. A diferencia de la Hojura Mecánica del Tipo 3, estas armónicas múltiples no cuentan con un piso de ruido elevado en los espectros.
B. DESALINEACIÓN PARALELA	1X 2X 3X		La Desalineación Paralela tiene características de vibración similares a la Desalineación Angular pero presenta una vibración radial alta que se aproxima a 180° fuera de fase a través del acoplamiento. Frecuentemente 2X es mayor que 1X, pero su altura relativa a 1X la impone el tipo de acoplamiento. Cuando la Desalineación Angular o Radial es severa, pueden generar picos de amplitud altos en armónicas mucho más altas (4X - 8X), o incluso toda una serie de armónicas de alta frecuencia similares en apariencia a la hojura mecánica. El tipo de acoplamiento y el material con frecuencia influyen enormemente en el espectro total cuando la desalineación es severa. Generalmente no presenta piso de ruido elevado.
C. RODAMIENTO DESALINEADO INCLINADO EN EL EJE	1X 2X 3X	 FASE 1 2:00 2 5:00 3 8:00 4 11:00	El Rodamiento Inclinado generará una vibración axial considerable. Causará un Movimiento Torcido con un cambio de fase de aprox. 180° entre la parte superior e inferior, izquierda y derecha de la caja que soporta el rodamiento. El tratar de alinearse el acoplamiento o equilibrar el rotor no solucionará el problema. Por lo general se debe retirar el rodamiento e instalarse correctamente.
<b>RESONANCIA</b>	 Amplitud Fase 90° 180°	 1a. Velocidad Crítica 2da. Velocidad Crítica	La resonancia ocurre cuando una Frecuencia de Oscilación Forzada coincide con la Frecuencia Natural del Sistema, y puede causar una crática amplificación en la amplitud que puede resultar en una fallo prematuro, o incluso catastrófico. Puede ocurrirse la frecuencia natural del rotor pero puede originarse frecuentemente en la base, en el cemento, en la caja de engranes o incluso en las correas (bandas) de poleas. Si un rotor se encuentra en resonancia o cerca de ella, puede ser casi imposible que se pueda lograr un equilibrado debido al cambio importante de fase que experimenta (90° en resonancia, casi 180° cuando pasa a través). Con frecuencia se requiere que la frecuencia natural cambie a una frecuencia más alta o más baja. Las frecuencias naturales generalmente no se alteran con cambios en velocidades de giro, lo cual facilita su identificación (con excepción de aquellos equipos con un cantilibrado significativo).

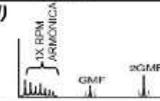
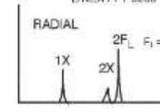
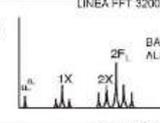
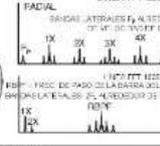
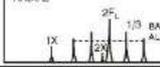
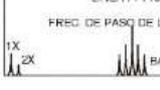
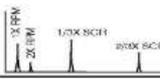
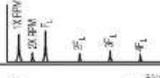
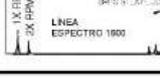
**TABLA I**  
**LISTA ILUSTRADA DE DIAGNÓSTICO DE VIBRACIONES**

FUENTE DEL PROBLEMA	ESPECTRO TÍPICO	RELACIÓN DE FASE	OBSERVACIONES
<b>HOLGURA MECÁNICA</b>			<p>La Holgura Mecánica se indica a través de un espectro de vibración de Tipo A, B o C.</p> <p>El Tipo A se debe a una holgura/ligereza Estructural de las bases de la máquina, de la placa base o del cemento; también se debe a un montaje defectuoso, a pernos de sujeción sueltos en la base, y a la distorsión del armazón o de la base (i.e. para suavis). El análisis de fase puede revelar una diferencia de fase de approx. 180° a 180° entre las lecturas verticales en el perno, en la base de la máquina, en la placa base y en la base en sí.</p> <p>El Tipo B por lo general se debe a pernos de soporte flojos, a fracturas en la estructura del armazón o en el pedestal del rodamiento.</p> <p>El Tipo C normalmente se genera a causa de un ajuste inadecuado entre las partes componentes originando muchas armónicas debido a la respuesta no lineal de las partes sujetas a las fuerzas dinámicas del rotor. Causa un truncamiento de la forma de onda y un piso de ruido mayor en el espectro. Con frecuencia el Tipo C se debe a que el aro exterior del rodamiento está flojo en su capa, a un rodamiento suelto y que da vueltas en su eje, a un ajuste excesivo en cojinetes planos y rodamientos, o por un impulso suelto en su eje, etc. Con frecuencia la Fase del Tipo C es inestable y puede variar entre lectura y lectura, sobre todo si el rotor cambia de posición en el eje de un arranque a otro. A menudo, la Holgura Mecánica es altamente direccional y puede provocar lecturas notablemente diferentes si se comparan los niveles en incrementos de 30° en dirección radial en toda la casa del rodamiento. Además, tenga en cuenta que la holgura con frecuencia provoca múltiples sub-armónicas a exactamente 1/36, 1/3 RPM (5X, 15X, 25X, etc.).</p>
<b>ROZAMIENTOS DEL ROTOR</b>			<p>Un rozamiento del rotor produce un espectro similar al de la Holgura Mecánica cuando las partes relativas tocan los componentes estacionarios. El contacto puede ser parcial o a lo largo de toda la revolución del eje. Normalmente se genera una serie de frecuencias, que por lo general excitan una o más resonancias. Con frecuencia excitan sub-armónicas de 1/4 (1/2, 1/3, 1/4, 1/5, ... 1/n) dependiendo de la ubicación de las frecuencias naturales del rotor. El rozamiento puede excitar muchas altas frecuencias (similar al ruido de banda ancha cuando un gas se pasa por el abarrotón). Puede ser muy serio y de corta duración si se debe a un eje que toca el metal basal del cojinete plano. En el caso de cojinetes planos si el problema se puede convertir en severo cuando se presenta rozamiento en toda la periferia del cojinete y el rotor se encuentra vibrando a la frecuencia de latiguo de aceite.</p>
<b>COJINETES PLANOS</b>			
<b>A. PROBLEMAS DE DESGASTE/HOLGURAS</b>			<p>Las últimas etapas de desgaste de los cojinetes planos por lo general se evidencian por la presencia de series completas de armónicas de la velocidad de giro (hasta 10 ó 20). A menudo los cojinetes planos soldados permiten amplitudes verticales altas en comparación con las horizontales, pero pueden mostrar sólo un pico pronunciado en 1X RPM. Los cojinetes planos con un holgura excesiva tendrán mayores niveles de vibración cuando se presenta un desequilibrio o desalineamiento. Estos niveles serán menores cuando las holguras entre eje y carcasa se encuentran dentro de las especificaciones.</p>
<b>B. INESTABILIDAD POR REMOLINO DE ACEITE</b>			<p>La inestabilidad del Remolino de Aceite ocurre a 40 - 45X RPM y con frecuencia es muy severa. Se considera excesivo cuando la amplitud excede el 40% de los espectros de los cojinetes. El Remolino de Aceite es una vibración excitada de película de aceite en donde las desviaciones en condiciones de operación normales (ángulo y posición de excentricidad) causan que la capa de aceite empuje al eje dentro del cojinete. La fuerza desestabilizadora en dirección de la rotación resulta en un remolino (o en una precesión hacia adelante). El remolino de Aceite es inestable ya que incrementa las fuerzas centrífugas que aumentan las fuerzas del remolino. Pueden hacer que el aceite ya no soporte al eje y se vuelva inestable cuando la frecuencia del remolino coincide con la frecuencia natural del rotor. Los cambios en la viscosidad del aceite, la presión de la lubricación y las cargas externas pueden afectar el remolino de aceite.</p>
<b>C. INESTABILIDAD DE LATIGUEO DE ACEITE</b>			<p>El Latiguo de Aceite puede ocurrir si la máquina opera en o por arriba de la frecuencia crítica de rotor 2X. Cuando el rotor se eleva a una velocidad del aceite de la crítica, el remolino estará muy cerca del punto crítico del rotor y puede ocasionar una vibración excesiva por lo que la película de aceite ya no será capaz de soportar. De hecho, la velocidad del remolino "se cerrará" en el punto crítico del rotor y este poco o pasará a través aunque a la máquina se le vea a velocidades más y más altas.</p>
<b>RODAMIENTOS (4 Etapas de daño)</b>			<p><b>4 ETAPAS DE DAÑO DEL RODAMIENTO</b></p> <p><b>ETAPA 1:</b> Las primeras indicaciones de problemas en los rodamientos aparecen en las frecuencias ultrasónicas que oscilan entre 250,000 - 350,000 Hz. Luego, a medida que se incrementa el desgaste, cae a aproximadamente 20,000 - 60,000 Hz (1,200,000 - 3,600,000 CPM). Estas son frecuencias evaluadas por el filtro Spike Energy (gSE), por HFD(g) y por el Pulso de Choque (SB). Por ejemplo, la energía de Spike Energy puede aparecer por primera vez a aproximadamente .25 gSE en la Etapa 1 (el valor real depende de la ubicación de la lectura y de la velocidad de giro de la máquina). La adquisición de espectros envolventes de alta frecuencia confirma si el cojinete se encuentra o no en la Etapa 1 de Daño.</p> <p><b>ETAPA 2:</b> Los defectos ligeros del rodamiento comienzan a "crocotar" las frecuencias naturales (f<sub>n</sub>) de sus componentes que generalmente ocurren en un rango de 30K - 120K CPM. Dichas frecuencias naturales también pueden ser resonancias de las estructuras de apoyo del rodamiento. Las frecuencias de bandas laterales aparecen arriba y abajo del pico de frecuencia natural al final de la Etapa 2. La energía Spike Energy crece (por ejemplo de .25 a .50 gSE).</p> <p><b>ETAPA 3:</b> Aparecen armónicas y frecuencias de defectos del rodamiento. A medida que el desgaste progresa aparecen más armónicas de frecuencias de defecto y el número de bandas laterales crece, tanto alrededor de estas y de las frecuencias naturales del componente del cojinete. La energía Spike Energy continua incrementándose (por ejemplo, de .5 a más de 1 gSE). En esta etapa por lo general el desgaste es visible y se puede extender a toda la periferia del cojinete, sobre todo cuando varias bandas laterales bien formadas acompañan a las armónicas de frecuencias de defecto del rodamiento. Los espectros demodulados de alta frecuencia y envolventes ayudan a confirmar la Etapa III. (Reemplace los rodamientos ahora! Independientemente de las amplitudes de frecuencia defectuosas del rodamiento en los espectros de vibración).</p> <p><b>ETAPA 4:</b> Hacia el final, incluso se afecta la amplitud 1X RPM. Crece, y normalmente causa el crecimiento de muchas armónicas de 1X. Las frecuencias naturales de los rodamientos y de componentes comienzan a "desaparecer" y se reemplazan con "ruido" de alta frecuencia, de banda ancha y aleatorio. Además, las amplitudes tanto del ruido de alta frecuencia y de Spike Energy pueden en efecto disminuir, sin embargo, justo previo al paro catastrófico, la energía Spike Energy y HFD por lo general crecen a amplitudes excesivas.</p>

**LISTA ILUSTRADA DE DIAGNÓSTICO DE VIBRACIONES**

FUENTE DEL PROBLEMA	ESPECTRO TÍPICO	OBSERVACIONES
<b>FUERZAS HIDRÁULICAS Y AERODINÁMICAS</b>		
A. PASO DE ALABES/ PASO DE ASPAS		Frecuencia de Paso de Alabes (BPF por sus siglas en inglés) = Núm. de Alabes (o Aspas) X RPM. Esta frecuencia es presente en bombas, ventiladores y compresores y por lo general no presenta problemas. Sin embargo, un BPF de amplitud grande (y armónicas) puede generarse en una bomba en caso de que el espacio entre los Alabes y los Difusores adyacentes no sea igual en todos los puntos. Además, el BPF (o armónicas) puede coincidir a unas veces con una frecuencia natural del sistema causando alta vibración. El BPF alto puede generarse en caso de que el anillo de desgaste del impulsor se atore en el ojo, o en caso de que fallen las soldaduras de los difusores. Así mismo, el BPF alto puede deberse a doblemetros abruptos en la tubería (o en el ducto), a obstrucciones que restringen el flujo, o los ajustes de amarrado o a la bomba o al rotor del abanico se posicionan de forma excéntrica dentro de la caja. Con frecuencia y turbulencia de flujo ocurre en los sopladores debido a variaciones en la presión o en la velocidad del aire que pasa a través del abanico o de los ductos conexiones. Este pasaje de flujo causa una turbulencia que generará una vibración de alta frecuencia aleatoria. Usualmente en el rango de 50 a 2000 CPM. En caso de que ocurra una sacudida dentro del compresor, puede haber una vibración de alta frecuencia de banda ancha o eólica. La turbulencia excesiva también puede generar alta frecuencia en la banda ancha.
B. TURBULENCIA DEL FLUJO		La cavitación normalmente genera una energía de banda ancha de frecuencia más alta y aleatoria que algunas veces se solapará con las armónicas de frecuencia de paso de alabes. Por lo general, indica presión insuficiente de succión. La cavitación puede ser destructiva en la parte interna de la bomba si no se corrige. Puede dañar en especial a los alabes del impulsor. Cuando está presente, con frecuencia se oye como si pasara 'arena' a través de la bomba. Por lo general, la cavitación se debe a un flujo interno insuficiente. Puede ocurrir cuando una restricción y después ocurre en la siguiente restricción (s) se hacen cambios en los ajustes de la válvula de succión.
C. CAVITACIÓN		
<b>ENGRANES</b>		
A. ESPECTRO NORMAL		El espectro Normal muestra las velocidades de engrane y del Piñón junto con la frecuencia de engranaje de engranes (GMF) y armónicas de GMF muy pequeñas. Las armónicas (GMF) cuentan por lo general con bandas laterales de velocidad de giro a su alrededor. En las partes con alta amplitud, y no se añaden las frecuencias naturales de los engranes. Se recomienda $F_{max}$ en 3.25X GMF (mínimo) cuando sea conocido el número de dientes. Si no se conoce el número de dientes fijar el $F_{max}$ en 200X RPM en cada eje.
B. DESGASTE DEL DIENTE		El indicador clave de Desgaste del Diente es la excitación de la Frecuencia Natural del Engrane (Y) junto con las bandas laterales alrededor de esta, especialmente en la velocidad de giro de engrane defectuosa. La frecuencia de engranaje (GMF) puede o no cambiar la amplitud, aunque las bandas laterales de engranaje (Y) y el Mínimo de bandas laterales que rodean al GMF por lo general ocurren cuando se rota el desgaste. Las bandas laterales pueden ser un mejor indicador del desgaste, que las frecuencias GMF en sí. Además las áreas amplias ocurren por lo general en 2XGMF o en 3XGMF (especialmente en 3XGMF) aun cuando la amplitud GMF sea aceptable.
C. CARGA DEL DIENTE		Normalmente las frecuencias de engranaje son muy sensibles a la carga. Las altas amplitudes GMF no necesariamente indican un problema, sobre todo si las amplitudes de las bandas laterales permanecen en un nivel bajo y no se excitan las frecuencias naturales de engrane. Cada análisis debe realizarse a máxima carga para poder tener espectros comparativos en un programa de monitoreo.
D. EXCENTRICIDAD DEL ENGRANE Y BACKLASH		Las bandas laterales de amplitud relativamente alta alrededor de las armónicas GMF normalmente sugieren una excentricidad de engranes, un backlash inapropiado, o ejes no paralelos que permiten que la rotación de un eje "module" la amplitud GMF a la velocidad de giro del otro engrane. Se puede verificar el engrane defectuoso por el separado de las frecuencias de sus bandas laterales. Además, el nivel 1X RPM del engrane excéntrico por lo general será alto si la excentricidad es el problema principal. Normalmente, el backlash inapropiado excita a las armónicas GMF y a la Frecuencia Natural del Engrane, ambas tendrán bandas laterales de 1X RPM. En el caso de backlash inapropiado, las amplitudes disminuirán al incrementar la carga del sistema.
E. DESALINEACIÓN DEL ENGRANE		La Desalineación de engranes casi siempre excita armónicas GMF de segundo orden o más altas, las cuales tienen bandas laterales de la velocidad de giro. Con frecuencia esto muestra una amplitud pequeña de 1X GMF pero niveles mucho más altos en 2X a 3X GMF. Es importante fijar el $F_{max}$ suficientemente alto para capturar al menos una armónica de 3 GMF. Además, las bandas laterales alrededor de 2XGMF con frecuencia serán excidadas a 2X RPM. Observe que las amplitudes de las bandas laterales no son iguales en los lados izquierdo y derecho del GMF y de las armónicas GMF debido a la desalineación del diente. Causa un patrón de desgaste desigual.
F. DIENTE ESTRELLADO/ROTO		Un Diente Quebrado o Agrietado genera una alta amplitud en 1X RPM en este engrane únicamente en la forma de onda, además de que excitará la frecuencia natural del engrane mostrando bandas laterales de 1X. Se detecta mejor en la forma de onda que mostrará un pico pronunciado cada vez que el diente corre el problema haga contacto con los dientes en el engrane complementario o el tiempo entre los impactos (T) correspondiente a 1/N-RPM de un engrane con armónicas 1 a 20 veces más altas que aquellas a 1X RPM en el eje adyacente.
G. PROBLEMAS DE FASE EN EL ENSAMBLAJE DEL ENGRANE		La Frecuencia de Fase del Ensamble del Engrane (GAPF) puede resultar en Frecuencias de engranaje fraccionales (S/N, +/-). Literalmente significa que el diente de engrane (1/N) contactará a los dientes del otro (1/N) y generará patrones de desgaste N <sub>2</sub> donde N <sub>2</sub> es una combinación de diente cada equivalente al producto de los factores primos comunes al número de dientes en el engrane y en el piñón (N <sub>2</sub> = Factor de Fase de Ensamblaje). GAPF (o armónicas) pueden aparecer desde el momento si existieran problemas de manufactura. Además, su aparición repentina en un espectro de monitoreo periódico puede indicar un daño en caso de que las bobinas contaminantes pasen a través del engranaje, resultando en un daño a los dientes de ambos engranes por los cuales pasó la partícula.
H. FRECUENCIA DE ENCUENTRO DE DIENTES		La Frecuencia de Encuentro de Dientes (F <sub>ED</sub> ) ocurre cuando se presentan daños tanto en el engrane como en el piñón, que pueden haber ocurrido durante el proceso de manufactura debido a mal ranjeo, o en el campo. Puede causar una alta vibración, pero ya que esta ocurre en frecuencias bajas (normalmente menores a 800 CPM), por lo general se pasa por alto. Un juego de engranes con este problema exhibe un diente normalmente entre un "bonguero". El efecto máximo ocurre cuando los dientes dañados del piñón y del engrane se encuentran en algunas orientaciones, esto puede ocurrir únicamente en 1 de cada 12 a 20 revoluciones dependiendo de la fórmula (n). Observe que T <sub>ED</sub> y T <sub>ED</sub> se refieren al número de dientes en el engrane y al piñón respectivamente. N <sub>2</sub> es el Factor de Fase de Ensamblaje definido anteriormente. Con frecuencia modula a los picos del GMF y RPM del engrane.

**LISTA ILUSTRADA DE DIAGNÓSTICO DE VIBRACIONES**

FUENTE DEL PROBLEMA	ESPECTRO TÍPICO	OBSERVACIONES
<b>ENGRANES (CONTINUACIÓN)</b> 1. AJUSTE HOLSADO DEL COJINETE		El huelgo excesivo de los rodamientos que sostienen los engranes no únicamente pueden excitar las armónicas de velocidad de giro, sino que a menudo también causará una respuesta de amplitud alta en GMF. 20GMF y/o 30GMF. En realidad, estas amplitudes altas en GMF, recuerden a, y no son la causa de, la holgura dentro de los rodamientos que sostienen a los engranes. Este huelgo excesivo puede ser causa de un desgaste mayor en los rodamientos o por un ajuste inapropiado de un cojinete plano durante la instalación. Si no se corrige, puede causar un desgaste excesivo en los engranes y dañar otros componentes.
<b>MOTORES DE INDUCCIÓN AC</b> <b>A. EXCENTRICIDAD DEL ESTATOR, LAMINACIÓN EN CORTOCIRCUITO O ESTATOR SUELTO</b>		Los problemas en el estator generan una alta vibración a 2X la frecuencia de la línea eléctrica (2FL). La excentricidad del estator produce un entrehierro irregular estacionario entre el rotor y el estator, lo cual produce una vibración muy direccional. El entrehierro no debe exceder más del 5% para motores de inducción y el 10% para motores sincrónicos. Las patas suaves y las bases torcidas pueden dar como resultado un estator excéntrico. El estator suelto a su carcasa se debe a una holgura o debilidad en el soporte del estator. Las laminaciones de estator con cortocircuito pueden causar un calentamiento irregular, el cual puede distorsionar al estator en sí. Esto produce una vibración inducida por efectos térmicos que puede incrementarse significativamente con el tiempo de operación, causando una distorsión en el estator y problemas en el entrehierro.
<b>B. ROTOR EXCÉNTRICO (Entrehierro variable giratorio)</b>		El rotor excéntrico produce un entrehierro variable entre el rotor y el estator, lo cual produce una vibración pulsante (normalmente entre 2FL y la armónica de velocidad de giro más cercana). Por lo regular se requiere un espectro de "zoom" para separar 2FL y la armónica de velocidad de giro. Los rotores excéntricos generan 2FL, rodeados por bandas laterales de frecuencia de Paso de Polos (Fp), así como por bandas laterales de Fp que se encuentran alrededor de la velocidad de giro. Fp aparece por sí misma a una frecuencia baja (Frecuencia de Paso de Polo = Frecuencia de Desplazamiento X # de Polos). Los valores comunes de Fp oscilan entre 20 y 120 CPM (0.3 - 2.0 Hz). Una pata suave o un desalineamiento provoca a menudo un entrehierro variable debido flexiones mecánicas (de hecho, es un problema mecánico, no eléctrico).
<b>C. PROBLEMAS EN EL ROTOR</b> Estator Barras del Rotor Rotor Motor de 2 Polos Entrehierro Conductores Campo Magnético		Las barras del rotor rotas o agrietadas o anillos de corto circuito rotos o agrietados, uniones en mal estado entre las barras del rotor y los anillos de corto circuito, o laminaciones del rotor en cortocircuito, producen una alta vibración de velocidad de giro en 1X con bandas laterales de frecuencia del peso de polos (Fp). Además estos problemas a menudo generarán que las bandas laterales Fp estén alrededor de la segunda, tercera, cuarta y quinta armónica de velocidad de giro. Las barras del rotor abiertas o sueltas se indican mediante bandas laterales de frecuencia de línea 2FL (que cubren la frecuencia de paso de las barras del rotor (RBPF) y/o su armónica (RBPF = número de barras X RPM)). A menudo causará niveles altos en 2X RBPF, con sólo una pequeña amplitud en 1X RBPF. La producción de chispas electro-magnéticas inducidas entre las barras sueltas del rotor y los anillos de sujeción mostrarán niveles altos en 2X RBPF (con bandas laterales 2FL), pero sin incremento o con un incremento muy pequeño en las amplitudes de 1X RBPF. Los problemas de fase debido a conectores sueltos o rotos pueden causar una vibración excesiva en la frecuencia de línea de 2X (2FL), la cual presentará bandas laterales alrededor de esta, con un espaciado de 1/3 de la frecuencia de línea (1/3 FL). Los niveles en 2FL pueden exceder 1.0 pulg/seg. si no se corrigen. Este es un problema en particular si el conector defectuoso sólo hace un contacto esporádico. Los conectores sueltos o partidos, se deben reparar para prevenir un daño mayor.
<b>D. PROBLEMAS DE FASE (Conector suelto)</b>		
<b>MOTORES SINCRÓNICOS DE CA (Bobinas sueltas del Estator)</b>		Las bobinas sueltas del estator en motores sincrónicos generarán una vibración bastante alta en la Frecuencia de Paso de la Bobina (CP) que equivale al número de bobinas del estator X RPM (# de bobinas del estator = # de Pólos X # Bobinas/Polos). La Frecuencia de Paso de la Bobina estará rodeada por las bandas laterales 1X RPM. Los problemas en los motores sincrónicos también pueden indicarse por picos de amplitud alta de 80,000 a 90,000 CPM aproximadamente, acompañados por bandas laterales 2FL. Tome al menos un espectro con Fmax mayor a 90,000 CPM en cada caja apoyo del motor.
<b>MOTORES DE C.D. Y SUS CONTROLES</b> <b>A. ESPECTRO NORMAL</b>		Varios Problemas en los Motores DC y sus controles pueden detectarse con un análisis de vibración. Los motores DC rectificadores de onda completa (B SCR) producen una señal en la frecuencia de línea en 6X (6F = 360 Hz = 21,600 CPM); en tanto que los motores DC rectificadores de onda media (B SCR) producen una frecuencia de línea en 3X (3FL = 180 Hz = 10,800 CPM). La frecuencia de disparo de los SCR normalmente se presenta en el espectro de los motores DC, pero en una amplitud baja. Note la ausencia de otros picos en los múltiplos de F.
<b>B. EMBOBINADO DE LA ARMADURA PARTIDO, PROBLEMAS DE TIERRA O SISTEMA DE SINTONIZACIÓN DEFECTUOSO</b>		Cuando los espectros del Motor CD están dominados por niveles altos en SCR o 2X SCR, esto por lo general indica que los Embobinados del Motor están rotos o que hay un defecto en el Sistema de Sintonización del control eléctrico. La sintonización correcta en sí puede reducir significativamente la vibración a SCR y a 2X SCR, en caso de que predominen los problemas de control. Las amplitudes altas en estas frecuencias normalmente estarían arriba de 10 pulg/seg, con pico en 1X SCR y cerca de .04 pulg/seg. en la frecuencia de actividad 2X SCR.
<b>C. TABLILLA DE DISPARO DEFECTUOSA Y/O FUSIBLES FUNDIDOS</b>		Cuando una tarjeta de disparo falla, entonces se está perdiendo 1/3 de energía y puede causar cambios momentáneos y repentinos de velocidad en el motor. Esto puede provocar amplitudes altas en las frecuencias SCR de 1/3X y 2/3X (Frecuencia SCR 1/3X = 1XFL para rectificadores de onda media, y 2X FL para SCR rectificadores de onda completa). Precaución: Se deben conocer las configuraciones del SCR / tarjetas antes de reparar el motor (#SCR, # de tarjetas de disparo, etc.).
<b>D. SCR DEFECTUOSO, TABLILLA DE CONTROL CON CORTOCIRCUITO, CONEXIONES SUELTAS Y/O FUSIBLES FUNDIDOS</b>		Los SCR defectuosos, las tablas de control con cortocircuito y/o las conexiones sueltas, pueden generar picos de amplitud notable en diversas combinaciones de frecuencias de línea (FL) y en las frecuencias de disparo SCR. Normalmente un SCR defectuoso puede causar niveles altos en FL y/o en 5FL en motores con 6 SCR. Lo que hay que señalar es que 1FL, 2FL, 4FL, así como también 5FL, deben presentarse en los espectros de los motores DC.
<b>E. TARJETA COMPARADORA DEFECTUOSA</b>		Las tarjetas comparadoras defectuosas causan problemas con fluctuaciones en las RPM. Esto causa un colapso o una regeneración constante del campo magnético. Estas bandas laterales a menudo se aproximan a la fluctuación en RPM's y requieren de una alta resolución en el espectro para su detección. Dichas bandas laterales también pueden ser causa de la generación y regeneración del campo magnético.
<b>F. PASO DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA A TRAVÉS DE LOS RODAMIENTOS DE LOS MOTORES DC</b>		Por lo general, el "tuning" eléctricamente inducido se detecta mediante una serie de frecuencias diferentes con el espacio a menudo ubicado en la frecuencia de defecto de la pista externa (BPF) aún y cuando dicha fluctuación está presente tanto en las pistas interiores como en las exteriores. Por lo regular se presentan en un rango centrado de 100,000 a 150,000 CPM aproximadamente. Se recomienda un espectro de 180K CPM con 1800 líneas de resolución tomadas en ambos rodamientos del motor.

## TABLA I LISTA ILUSTRADA DE DIAGNÓSTICO DE VIBRACIONES

FUENTE DEL PROBLEMA	ESPECTRO TÍPICO	OBSERVACIONES
<b>PROBLEMAS EN POLEAS Y CORREAS (BANDAS)</b>		
<p><b>A. BANDAS DESGASTADAS, HOLGADAS O MAL ACOPLADAS</b></p>		<p>FREC. DE LA BANDA = <math>3.142 \times \text{POLEA RPM} \times \text{DIAM PASO LONGITUD DE LA BANDA}</math></p> <p>FREC. DE LA BANDA DENTADA = <math>\text{FREC. DE LA BANDA} \times \# \text{ DE DIENTES DE LA BANDA} = \text{RPM DE LA POLEA} \times \# \text{ DIENTES DE LA POLEA}</math></p> <p>Las frecuencias de las bandas se encuentran debajo de las RPM del motor o de la máquina impulsada. Cuando están desgastadas, flojas o mal colocadas, por lo regular causan de 3 a 4 múltiplos de frecuencias de banda. A menudo la frecuencia de banda 2X es el pico dominante. Por lo regular, las amplitudes son inestables, algunas veces emiten pulsaciones por cercanía con frecuencias del motor y del equipo conducido. En el caso de poleas dentadas, el desgaste o la desalineación de las poleas se manifiesta por medio de amplitudes altas en la frecuencia de la banda reguladora del tiempo. En sistemas de sprocket y cadenas los problemas se ven en la Frecuencia de Paso de la Cadena que equivale al # de dientes de la Rueda X RPM.</p>
<p><b>B. DESALINEAMIENTO DE BANDAS / POLEAS</b></p>		<p>El desalineamiento de las poleas produce una alta vibración en 1X RPM, sobre todo en la dirección axial. La proporción de amplitudes entre los equipos motriz y conducido dependerá del lugar donde se tomaron las lecturas, así como de la masa y rigidez de las estructuras. A menudo con el desalineamiento de las poleas, la vibración axial más alta en el motor estará en las RPM del abanico o viceversa. Se puede confirmar midiendo la fase con el filtro a las RPM de la polea con mayor nivel de vibración axial, y enseguida comparando las lecturas axiales en cada rotor.</p>
<p><b>C. POLEAS EXCÉNTRICAS</b></p>		<p>Las poleas excéntricas causan una alta vibración en 1X RPM de la polea excéntrica. Normalmente la amplitud es más alta cuando está en línea con las bandas y se debe presentar tanto en los apoyos del equipo motriz como en el conducido. En ocasiones es posible equilibrar las poleas excéntricas, al colocar arandelas en los patos de seguridad. No obstante, aunque se equilibren, la excentricidad provocará una vibración y tensiones de fatiga inevitables en la banda. La excentricidad de la polea se puede confirmar con un análisis de fase en donde se muestren diferencias en la fase vertical y horizontal de casi 0° o 180°.</p>
<p><b>D. RESONANCIA DE LA BANDA</b></p>		<p>La Resonancia de la Banda puede causar amplitudes altas si la frecuencia natural de la banda se acerca, o coincide con el las RPM's de los equipos motriz o conducido. La Frecuencia Natural de la Banda se puede alterar al cambiar la tensión de la misma, la longitud de la banda o la sección transversal. La frecuencia natural se puede medir con el método de prueba de impacto con el equipo fuera de operación. Sin embargo, cuando se encuentra en operación, la Frecuencia Natural de la Banda tiende a ser ligeramente más alta en la parte más tensada y a ser más baja en la parte más holgada.</p>
<p><b>VIBRACIÓN DE PULSACIÓN</b></p>		
<p style="text-align: center;">ESPECTRO DE BANDA ANCHA</p> <p style="text-align: center;">ESPECTRO ZOOM</p>		<p>Una Frecuencia de Pulsación es el resultado de dos frecuencias espaciadas cercanas, las cuales entran y salen de sincronización la una respecto a la otra. El espectro de bandas ancha normalmente mostrará un pico pulsando hacia arriba y hacia abajo. Si se enfoca en este pico (espectro inferior) en realidad presenta dos picos espaciados cercanos. La diferencia en estos dos picos (<math>F_2 - F_1</math>) es la frecuencia de la pulsación, la cual aparece por sí misma en el espectro. Por lo general la frecuencia de pulsación no se puede apreciar en lecturas de monitoreo periódico, ya que es una frecuencia inherentemente baja que por lo regular se encuentra en el rango de 5 a 100 CPM aproximadamente.</p> <p>La vibración máxima se presenta cuando la onda de tiempo de una frecuencia (<math>F_1</math>) entra en fase con la onda de otra frecuencia (<math>F_2</math>). La vibración mínima ocurre cuando las ondas de estas dos frecuencias se colocan a 180° fuera de fase.</p>
<p><b>PATA SUAVE, PATA RESORTE Y RESONANCIA RELACIONADA CON LA PATA</b></p>		<p>"Pata suave" es cuando la base o la estructura de una máquina se flexiona en gran medida cuando se afloja un perno de sujeción y esto causa que la base se levante más de .002 - .003 pulgadas aproximadamente. Esto no siempre causa un gran incremento en la vibración. Sin embargo, puede suceder así en caso de que la pata suave afecte la alineación o el entrehierro del motor.</p> <p>"Pata Resorte" puede causar una gran distorsión en la estructura y trae como resultado un incremento en la vibración, fuerza y tensión en la estructura, en la caja del rodamiento, etc. Esto ocurre cuando un perno de sujeción se aprieta en la pata resorte intentando así nivelar la base.</p> <p>"Resonancia relacionada con la pata" puede causar incrementos drásticos en la amplitud de 5 a 15 veces o más, según se compara con la amplitud cuando se afloja el perno (o la combinación de pernos). Al estar apretado, este perno puede cambiar de forma notoria la frecuencia natural de la pata o de la estructura de la máquina en sí.</p> <p>La Pata Suave, la Pata resorte o la Resonancia Relacionada con la Pata, con frecuencia afecta la vibración a 1X RPM, pero también puede afectarla en la frecuencia de 2X, 3X, 2X F1, en la frecuencia de paso de arietes, etc. (en particular la Resonancia Relacionada con la Pata).</p>

## Norma ISO 2372-1974

### VIBRACIÓN MECÁNICA DE MÁQUINAS CON VELOCIDADES DE OPERACIONES ENTRE 100 Y 200 REV/S. Bases para la especificación de estándares de evaluación.

Las características más relevantes de la norma ISO 2372 son:

- Es aplicable a los equipos rotativos cuyo rango de velocidades de giro está entre 600 y 12.000 RPM.
- Los datos que se requieren para su aplicación son el nivel global de vibración en velocidad - valor eficaz RMS, en un rango de frecuencia entre 10 y 1.000 Hz, distinguiendo varias clases de equipos rotativos según la [Tabla 3](#).

Para utilizar la norma ISO 2372, basta con clasificar la máquina en estudio dentro de la clase correspondiente y una vez obtenido el valor global de vibración entre 600 y 60.000 CPM localizar en la [Tabla 4](#) la zona en la que se encuentra.

Clase	Descripción
Clase I	Equipos pequeños hasta 15 kW.
Clase II	Equipos medios, de 15 a 75 kW o hasta 300 kW con cimentación especial.
Clase III	Equipos grandes, por encima de 75 kW con cimentación rígida o de 300 kW con cimentación especial.
Clase IV	Turbomaquinaria (equipos con RPM > velocidad crítica).

**Tabla 3: Clasificación de equipos en ISO 2372.**

Velocidad (m/s, rms)	Tipos de máquinas			
	Clase I	Clase II	Clase III	Clase IV
0,16 a 0,28	A	A	A	A
0,28 a 0,45				
0,45 a 0,71				
0,71 a 1,12	B	B	B	B
1,12 a 1,8	B	B	B	B
1,8 a 2,8	C	C	C	C
2,8 a 4,5	C	C	C	C
4,5 a 7,1	C	C	C	C
7,1 a 11,2	D	D	D	D
11,2 a 18	D	D	D	D
18 a 28	D	D	D	D

<b>A</b> Buena	<b>C</b> Inatisfactoria
<b>B</b> Satisfactoria	<b>D</b> Inaceptable

**Tabla 4: Severidad de la vibración en ISO 2372.**



## ANALIZADOR DE VIBRACIONES MECÁNICAS DE DOS CANALES

*Vibracheck 200 es un poderoso analizador de vibraciones mecánicas de dos canales, colector de datos y balanceador, ideal para controlar confiabilidad de máquinas.*



### CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

- Se comercializa en varios modelos que se adaptan a las necesidades principales del mantenimiento industrial
- Dos entradas dinámicas para conectar acelerómetros, sensores de proximidad o pinzas amperométricas
- Mide aceleración, velocidad, desplazamiento y envolvente
- Mide espectros y formas de onda en ruta y fuera de ruta
- Mide órbitas
- Analiza fase usando dos acelerómetros
- Analiza espectros cruzados y coherencia
- Realiza análisis ODS
- Trabaja con lámparas estroboscópicas para analizar fase, frecuencias naturales y balanceo
- Analiza arranques y paradas de máquinas
- Balancea en uno y dos planos
- Protegido contra ingreso de polvo y humedad IP65
- 3 años de garantía
- Upgrade hacia otros modelos de dos canales

### VENTAJAS

- Es muy rápido y confiable para la recolección de mediciones en rutas
- Es liviano y fácil de transportar
- El display permite ver las mediciones y espectros en ambientes oscuros o con mucha luz

### ¿QUÉ MÁQUINAS CONTROLA?

- |                      |                           |
|----------------------|---------------------------|
| • Motores eléctricos | • Torres de enfriamiento  |
| • Bombas             | • Generadores             |
| • Ventiladores       | • Reductores              |
| • Compresores        | • Otros tipos de máquinas |
| • Centrifugas        |                           |

### ¿QUÉ PROBLEMAS DETECTA?

- Fallas en rodamientos
- Malas condiciones en la lubricación
- Cavitación
- Desbalanceos
- Desalineaciones
- Solturas mecánicas
- Problemas estructurales



### OPERACIÓN SIMPLE

La operación es intuitiva a través de opciones, iconos y selecciones simples.



**MANTENIMIENTO PREDICTIVO**

*Vibracheck* es ideal para controlar máquinas en un plan de mantenimiento predictivo. Es muy fácil de usar por lo que puede ser operado por técnicos o inspectores de mantenimiento.

Las rutas pueden incluir mediciones de espectros, formas de onda o niveles de vibraciones con un mínimo de trabajo para el operador.

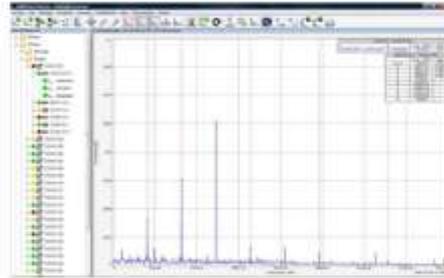
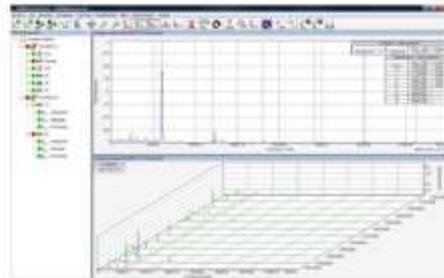
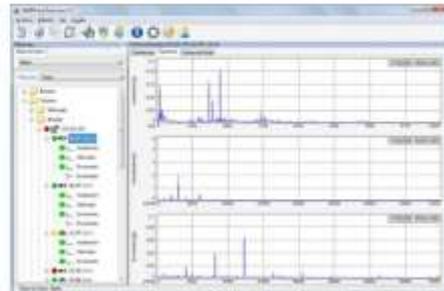
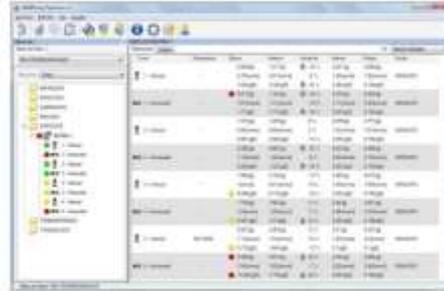
Lista de máquinas de una ruta:

REFINERIA	
●	RF1-257 VEN1-0057
	RF1-262 VEN1-0056
✓	CE1-178TRN3-0049
✓	CE1-179TRN3-0048
	CE1-182TRN3-0047

Lista de puntos de una máquina:

RF1-257 VEN1-0057	
1	- HORIZONTAL
1	- AXIAL
2	- VERTICAL
2	- HORIZONTAL
3	- VERTICAL

*Vibracheck* trabaja con el software *MAINTraq Predictive* para mantenimiento predictivo desde donde se pueden ver las tendencias, el estado de máquinas y realizar análisis de vibraciones.



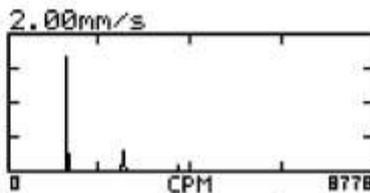
**MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

*Vibracheck* mide simultáneamente la aceleración, velocidad, envolvente y desplazamiento.

CANAL 1	
<b>0.28</b> g	<b>17.0</b> MM/S
<b>0.09</b> gE	<b>328</b> µM

**ESPECTROS**

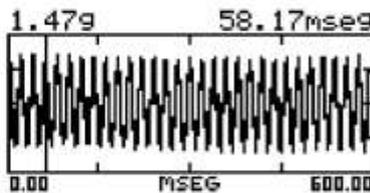
*Vibracheck (A)* mide y muestra espectros en rutas y fuera de ruta de hasta 6400 líneas de resolución, lo que permite una excelente discriminación de componentes de frecuencias para la mayoría de los casos prácticos.



Posee cursores y zoom para medir componentes de frecuencia en campo.

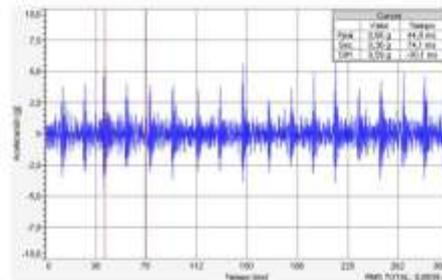
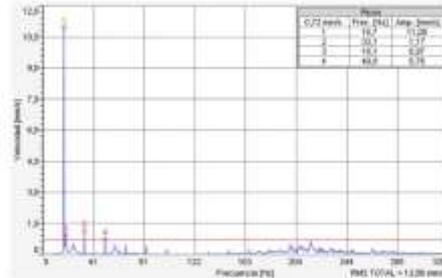
**FORMAS DE ONDA**

*Vibracheck (A)* mide y muestra formas de onda en rutas y fuera de ruta con frecuencia de muestreo y tiempo de medición configurables.



**MEDICIONES FUERA DE RUTA**

*Vibracheck (A)* mide, muestra y graba espectros, formas de onda y órbitas fuera de ruta para luego descargarlos y analizarlos en PC usando el software *MAINTraQ Reader*.



**ESTADO DE RODAMIENTOS**

*Vibracheck* evalúa el estado de rodamientos a partir de las RPM, diámetro del eje y del nivel de aceleración envolvente medido. En pocos segundos, *Vibracheck* indica si un rodamiento está funcionando bien, regular o mal.

ESTADO RODAMIENTO	
<b>BIEN</b>	+11.2
<b>1.54</b> gE	+3.72

### ESTADO VIBRATORIO

*Vibracheck* evalúa el nivel de vibraciones medido e indica el estado resultante de acuerdo a las recomendaciones de la norma ISO 10816.



Todo lo que se requiere para conocer el estado vibratorio es ingresar la potencia de la máquina, el tipo de base rígida o flexible para que *Vibracheck* indique si el nivel de vibraciones es aceptable, regular o inaceptable.

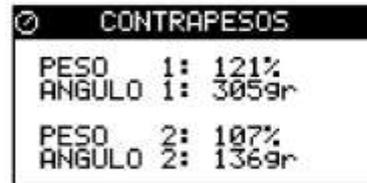
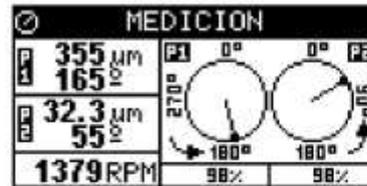
### ESTETOSCOPIO

*Vibracheck* posee salida para conectar auriculares estándar para poder escuchar los ruidos de máquinas durante la medición.

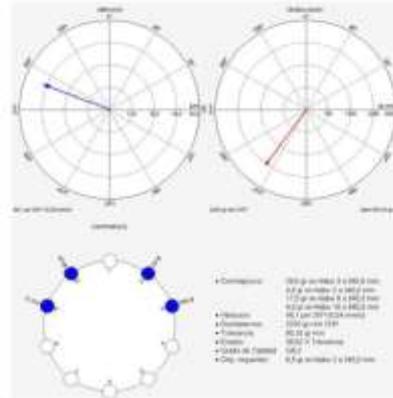
### BALANCEO

*Vibracheck* (B) permite equilibrar rotores con las siguientes características:

- Balancea en uno y dos planos en sitio o en balanceadora
- Opera desde 150 hasta 20000 RPM
- Indica las RPM
- Mide la amplitud y la fase de la vibración
- Indica el porcentaje de la vibración total causada por el desbalanceo
- Mide la fase de la vibración con respecto a una posición fija del eje por medio de un fototacómetro
- Utiliza uno o dos acelerómetros para medir la vibración
- Utiliza un fototacómetro para obtener la referencia de la posición angular
- Indica la magnitud y la posición de los contrapesos



*Vibracheck* (B) trabaja con el software *MAINTraQ Balance* para agregar las siguientes funciones:



- Emitir reportes
- Calificar balanceos de acuerdo a la norma ISO 1940
- Contrapesar rotores en un conjunto discreto de posiciones como en ventiladores
- Ajustar contrapesos
- Registrar coeficientes de influencia
- Sumar y dividir contrapesos
- Comparar las vibraciones y el desbalanceo antes y después del equilibrado

## ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Entradas dinámicas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rango de tensión de entrada: +/-22 V</li> <li>• Rango de frecuencias: DC a 10 KHz</li> <li>• Conversor analógico digital: 24 bits</li> <li>• Corriente para polarización de acelerómetros IEPE: 4 mA</li> <li>• Tensión de alimentación de fuente de corriente de acelerómetros IEPE: 22V</li> <li>• Sensibilidad configurable</li> <li>• Error de medición: &lt; 1%</li> <li>• 105 dB de rango dinámico</li> </ul>															
Rangos de medición con acelerómetros	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th></th> <th style="text-align: center;">Acelerómetro 100 mV/g</th> <th style="text-align: center;">Acelerómetro 500 mV/g</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Aceleración</td> <td style="text-align: center;">80 g Pico</td> <td style="text-align: center;">16 g Pico</td> </tr> <tr> <td>Envolvente</td> <td style="text-align: center;">80 g Pico</td> <td style="text-align: center;">16 g Pico</td> </tr> <tr> <td>Velocidad</td> <td style="text-align: center;">2000 mm/s pico a pico</td> <td style="text-align: center;">400 mm/s pico a pico</td> </tr> <tr> <td>Desplazamiento</td> <td style="text-align: center;">2000 micrones pico a pico</td> <td style="text-align: center;">400 micrones pico a pico</td> </tr> </tbody> </table>		Acelerómetro 100 mV/g	Acelerómetro 500 mV/g	Aceleración	80 g Pico	16 g Pico	Envolvente	80 g Pico	16 g Pico	Velocidad	2000 mm/s pico a pico	400 mm/s pico a pico	Desplazamiento	2000 micrones pico a pico	400 micrones pico a pico
	Acelerómetro 100 mV/g	Acelerómetro 500 mV/g														
Aceleración	80 g Pico	16 g Pico														
Envolvente	80 g Pico	16 g Pico														
Velocidad	2000 mm/s pico a pico	400 mm/s pico a pico														
Desplazamiento	2000 micrones pico a pico	400 micrones pico a pico														
Entrada de trigger:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rango de tensión de entrada: +/-22 V</li> <li>• Rango de frecuencias: DC a 10 KHz</li> <li>• Conversor analógico digital: 24 bits</li> <li>• Medición con sensores de proximidad fotoeléctricos, inductivos con salida PNP o NPN, sensores de proximidad de no contacto (Keyphasors) o pickups magnéticos</li> </ul>															
Resolución espectral	6400 líneas en Vibrachek o 102000 con MAINTraq Analyzer															
Medición de envolvente	Filtros y tiempos de retención configurable desde teclado o desde MAINTraq															
Medición de RPM y fase	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rango de medición: 150 a 20000 RPM</li> </ul>															
Acelerómetros	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wilcoxon Research modelo 780C</li> <li>• Sensibilidad 100 mV/g</li> <li>• Rango de frecuencia 2Hz-10KHz</li> <li>• Rango de aceleración: 50 g pico</li> <li>• Rango de temperatura -50°C a 120°C</li> <li>• Cable espiralado de 1,8 metros</li> <li>• Base magnética de 40 libras</li> </ul>															
Memoria	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Memoria micro SD de 4 GBytes</li> <li>• Almacenamiento típico: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 6000 Puntos de medición</li> <li>○ 1000 máquinas</li> <li>○ 6000 espectros de 400 líneas</li> <li>○ 500 Espectros, formas de onda u órbitas fuera de ruta</li> <li>○ Una grabación de arranques y paradas</li> <li>○ 10 ensayos ODS</li> </ul> </li> </ul>															
Comunicación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se comunica con PC por puerto USB</li> <li>• Velocidad a máxima de transferencia: 3 MBits/s</li> <li>• Transferencias automáticas</li> </ul>															
Baterías	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2 Celdas de Lito Ion</li> <li>• 12 horas de autonomía</li> <li>• Cargador incorporado</li> <li>• Fuente de alimentación para 110 / 220 VAC y salida 12VDC</li> </ul>															
Procesador	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Procesador de 16 bits @ 25 MHz</li> <li>• Procesador digital de señales (DSP) de 24 bits @ 180 MIPS</li> </ul>															
Salida para auriculares	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Salida para auriculares estándar de 32 Ohms</li> <li>• Control de volumen digital</li> </ul>															
Características mecánicas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dimensiones: 205 (Largo) x 110 (Ancho) x 42 (Altura) mm</li> <li>• Peso: 800 gramos.</li> <li>• Conectores Amphenol roscados IP65</li> </ul>															
Display	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Display gráfico de 128 x 64 pixeles</li> <li>• Reflectivo, con fondo blanco y alto contraste para operar en ambientes con mucha luz</li> <li>• Iluminación posterior para operación en ambientes oscuros</li> </ul>															
Condiciones ambientales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rango de temperatura: 0 a 70°C</li> <li>• Protegido contra ingreso de polvo y agua (IP65)</li> </ul>															
Firmware	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Actualizable por medio de Vibrachek Update</li> </ul>															

## MODELOS

MODELO	FUNCIONES						RECOMENDADO PARA
	MEDICIONES	EVALUACIÓN	RUTAS	ANÁLISIS	BALANCEO	ANÁLISIS ESPECIALES	
A	•	•	•	•			Inspectores de máquinas que necesiten medir y analizar vibraciones
B	•	•			•		Usuarios que únicamente necesiten balancear
AB	•	•	•	•	•		Inspectores de máquinas que necesiten medir y analizar vibraciones
ABO	•	•	•	•	•	•	Inspectores de máquinas que necesiten analizar vibraciones y ODS
ABG	•	•	•	•	•	•	Especialistas que necesiten realizar análisis más detallados
ABGO	•	•	•	•	•	•	Especialistas que necesiten realizar análisis especiales y ODS

MODELO	FUNCIONES
A	<ul style="list-style-type: none"> <li>Medición y visualización de espectros y formas de onda en ruta y fuera de ruta</li> <li>Análisis de órbitas fuera de ruta</li> <li>Análisis de fase usando dos acelerómetros</li> <li>Análisis con lámpara estroboscópica (no incluida)</li> </ul>
B	<ul style="list-style-type: none"> <li>Balaceo en un plano y dos planos usando <i>Vibracheck</i></li> <li>Balaceo en un plano y dos planos usando <i>MAINTraQ Balance</i></li> </ul>
G	<ul style="list-style-type: none"> <li>Registra mediciones hasta 12 horas en <i>Vibracheck</i> y en PC usando <i>MAINTraQ Analyzer</i></li> <li>Muestra diagrama de tendencias en <i>Vibracheck</i></li> <li>Muestra diagrama de Bode y Polar en <i>Vibracheck</i></li> <li>Analiza señales usando <i>MAINTraQ Analyzer</i></li> </ul>
O	<ul style="list-style-type: none"> <li>Realiza análisis ODS junto con el software <i>MAINTraQ ODS</i></li> </ul>

## PARTES INCLUIDAS

PARTE	MODELO					
	A	B	AB	ABO	ABG	ABGO
Analizador <i>Vibracheck</i>	•	•	•	•	•	•
Funda de protección con correa de transporte	•	•	•	•	•	•
Acelerómetro <i>Wilcoxon</i> modelo 780C con cable espiralado y base magnética	•	•	•	•	•	•
Cable de comunicación USB	•	•	•	•	•	•
Fuente de alimentación para carga de baterías	•	•	•	•	•	•
Fotocómetro con base magnética y cinta reflectiva	•	•	•	•	•	•
Software <i>MAINTraQ Predictive</i> <a href="http://www.idcar.net/Especificaciones/MAINTraQPredictive.pdf">www.idcar.net/Especificaciones/MAINTraQPredictive.pdf</a>	•				•	•
Software <i>MAINTraQ Reader</i> <a href="http://www.idcar.net/Especificaciones/MAINTraQReader.pdf">www.idcar.net/Especificaciones/MAINTraQReader.pdf</a>	•				•	•
Software <i>MAINTraQ Balance</i> <a href="http://www.idcar.net/Especificaciones/MAINTraQBalance.pdf">www.idcar.net/Especificaciones/MAINTraQBalance.pdf</a>		•	•	•	•	•
Software <i>MAINTraQ Analyzer</i> <a href="http://www.idcar.net/Especificaciones/MAINTraQAnalyzer.pdf">www.idcar.net/Especificaciones/MAINTraQAnalyzer.pdf</a>					•	•
Software <i>MAINTraQ ODS</i> <a href="http://www.idcar.net/Especificaciones/MAINTraQODS.pdf">www.idcar.net/Especificaciones/MAINTraQODS.pdf</a>				•		•
Software Transfer para descarga de archivos de <i>Vibracheck</i> y carga de rutas	•	•	•	•	•	•

## ACCESORIOS OPCIONALES

DESCRIPCIÓN	NUMERO DE PARTE
Cable para conexión de lámpara estroboscópica	AMPH08-02-PLUG25
Cable de 2 metros con conector <i>Amphenol</i> para <i>Vibracheck</i> en un extremo y conector BNC en el otro extremo	AMPH02-02-BNC
Cable de 10 metros con conector <i>Amphenol</i> para <i>Vibracheck</i> en un extremo y conector BNC en el otro extremo	AMPH02-10-BNC
Pinza amperométrica marca <i>Fluke</i> rango 400 Amperes y conector <i>Amphenol</i> para <i>Vibracheck</i>	AMPH02-AMP400
Valija de transporte	VCK-VT



## Anexo D: Datos técnicos PLC RIEVTECH EXM-12DC-DA-RT-GWIFI

### ◆ Technical Data:

**Model:EXM-12DC-DA-RT-GWIFI**

#### GENERAL SPECIFICATIONS

Timers : 512

Counters : 512

SMS Message input: 32

SMS Message output: 64

SMS Message input output: 12

Function Blocks: 512

Operation temp.: -20°C-55°C

Storage:-40°C-70°C

Protection: IP20(Non-waterproof)

RTC accuracy : MAX ±2S/day

RTC Backup at 25 °C: 20 days

Program and settings Backup :10 years

Data Power-off retentivity: 10 years

Modify parameters via keypad LCD: yes

Dimensions: 95\*90\*67 (Unit: mm)

Certificate: CE

Installation: 35-DIN rail or screw for installation

Expansion capacity: 8 modules (EXM-E-8)

Password protection : 4-digit number password protection or disable program upload function

Communication interface : 1 RS232 port /TTL. The extension port can be worked as RS485 port,  
if no IO extension used with CPU.

Communication protocol : Modbus RTU/ASCII

**RIEVTECH**



#### Technical Index

Power supply:	
Nominal voltage	DC 12-24V
Operating limits	DC 10.8-28.8V
Immunity from micro power cuts	Typ.5 ms
Max. Startup current	Max. 0.25A
Max. absorbed power	3.5 W (10.8V dc) ; 4 W (28.8V dc)
Protection against polarity inversions	Yes
Input parameters:	
Input No	8 ( I1-I8 )
Digital input	8 ( I1-I8 )
Analogue input	4 ( I1-I4)(0..10V DC)
Digital inputs( I5-I8 )	
Input voltage	DC0-28.8V
Input signal0	< 5V DC; <1mA
Input signal1	> 8 V DC; >1.7mA
Input current	2.3mA @ 10.8V dc 2.6mA @ 12.0 V dc

	5.2 mA @ 24 V dc 6.3 mA @ 28.8 V dc
Response time	0 to 1 : <1 ms ; 1 to 0 : <1 ms
Maximum counting frequency	60k Hz(I7--I8)
Sensor type	Contact or 3-wire PNP
Input type	Resistive
Isolation between power supply and inputs	None
Isolation between inputs	None
<b>Inputs used as digital inputs( I1-I4 )</b>	
Input voltage	DC0-28.8V
Input signal0	< 5V DC; <0.1mA
Input signal1	> 8 V DC; >0.3mA
Input current	0.4mA @ 10.8V dc 0.5mA @ 12.0 V dc 1.2mA @ 24 V dc 1.5mA @ 28.8 V dc
Response time	0 to 1 : Typ. 1.5 ms ; 1 to 0 : Typ. 1.5 ms
Maximum counting frequency	Typ.: 4 HZ
Sensor type	Contact or 3-wire PNP
Input type	Resistive
Isolation between power supply and inputs	None
Isolation between inputs	None
<b>Inputs used as analog inputs( I1-I4 )</b>	
Measurement range	DC 0---10V
Input impedance	Min, 24K $\Omega$ ; Max. 72K $\Omega$
Input voltage	28.8 V DC max
Resolution	10bit ,0.01V
Accuracy at 25 °C	$\pm$ (Max.0.02)V
Accuracy at 55 °C	$\pm$ (Max.0.04)V
Isolation between analog channel and power supply	None
Cable length	10 m max. shielded and twisted
<b>Output parameters:</b>	
Output No.	4 (Q1-Q4)
Output type	2Relay output +2 Transistor(PNP) output
Continuous current	(Q1-Q2)Resistive load 10A/Inductive load 2A (Q3-Q4) Max. 0.3 A per channel
Max. breaking voltage	(Q1-Q2) AC 250 V DC 30 V (Q3-Q4) $\leq$ Supply voltage
Max. Allowable Power Force	(Q1-Q2)1250VA 300W (Q3-Q4) 9 W
Electrical durability Expectancy	10 <sup>5</sup> Operations at Rated Resistive Load
Mechanical life	10 <sup>7</sup> Operations at No Load condition
Response time	Operate Time : 15 mSec. Max. Release Time : 10 mSec. Max.
Built-in protections	Against overloads and short-circuits: No Against overvoltages (*): No
Galvanic isolation	None

PWM frequency(Q3-Q4)	1K HZ
PWM cyclic ratio(Q3-Q4)	0 to 100 %
PWM accuracy at 120Hz(Q3-Q4)	< 0.5 % (20 % → 80 %) load at 10 mA
Max. Breaking current PWM(Q3-Q4)	50 mA
<b>Switch frequency:</b>	
Mechanism	10Hz
Resistor/light load	2Hz
Sensitive load	0.5Hz
<b>Built-in wireless parameters:</b>	
Support 802.11b/g/n wireless standards	
Support TCP/IP/UDP network protocols	
Support work as STA/AP mode	
Support Router/Bridge mode networking	
Support Transparent/Agreement Transmission Mode(Transparent used by EXM CPU)	
Support Friendly Web Configuration Page or configuration by eSmsconfig	
Outdoor 100m with 3dBI antenna and indoor 40m	
FCC /CE Certificated	
<b>GSM parameter</b>	
Type of mobile wireless service	SMS, GPRS
Operating frequency	850MHz,900MHz,1800MHz,1900MHz,
for GPRS transmission / with downlink / maximum	80 kbit/s
for GPRS transmission / with uplink / maximum	40 kbit/s
<b>Other parameters:</b>	
Ethernet port:	Built-In(10M/100M)
Xlogic<--->Xlogic(byWifit)	1 xlogic works as server can connect 32 client xlogics.
Xlogic<--->Etherne/Internet:	xlogic works as TCP server or TCP client
Weight	Approx.300g

#### Installation Dimensions & Wiring Diagram



## Small, Low Power, 3-Axis $\pm 3 g$ Accelerometer

### ADXL335

#### FEATURES

- 3-axis sensing
- Small, low profile package
  - 4 mm  $\times$  4 mm  $\times$  1.45 mm LFCSP
- Low power : 350  $\mu$ A (typical)
- Single-supply operation: 1.8 V to 3.6 V
- 10,000 g shock survival
- Excellent temperature stability
- BW adjustment with a single capacitor per axis
- RoHS/WEEE lead-free compliant

#### APPLICATIONS

- Cost sensitive, low power, motion- and tilt-sensing applications
- Mobile devices
- Gaming systems
- Disk drive protection
- Image stabilization
- Sports and health devices

#### GENERAL DESCRIPTION

The ADXL335 is a small, thin, low power, complete 3-axis accelerometer with signal conditioned voltage outputs. The product measures acceleration with a minimum full-scale range of  $\pm 3 g$ . It can measure the static acceleration of gravity in tilt-sensing applications, as well as dynamic acceleration resulting from motion, shock, or vibration.

The user selects the bandwidth of the accelerometer using the  $C_x$ ,  $C_y$ , and  $C_z$  capacitors at the  $X_{OUT}$ ,  $Y_{OUT}$ , and  $Z_{OUT}$  pins. Bandwidths can be selected to suit the application, with a range of 0.5 Hz to 1600 Hz for the X and Y axes, and a range of 0.5 Hz to 550 Hz for the Z axis.

The ADXL335 is available in a small, low profile, 4 mm  $\times$  4 mm  $\times$  1.45 mm, 16 lead, plastic lead frame chip scale package (LFCSP\_LQ).

#### FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

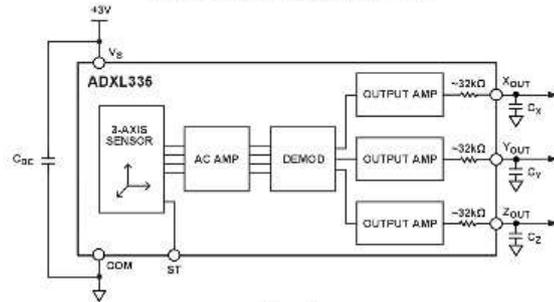


Figure 1.

#### Rev. B

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.  
 Tel: 781.329.4700 [www.analog.com](http://www.analog.com)  
 Fax: 781.461.3113 ©2009–2010 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

## SPECIFICATIONS

$T_A = 25^\circ\text{C}$ ,  $V_S = 3\text{ V}$ ,  $C_X = C_Y = C_Z = 0.1\ \mu\text{F}$ , acceleration = 0 g, unless otherwise noted. All minimum and maximum specifications are guaranteed. Typical specifications are not guaranteed.

Table 1.

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
<b>SENSOR INPUT</b>					
Measurement Range	Each axis	+3	+3.6		g
Nonlinearity	% of full scale		+0.3		%
Package Alignment Error			$\pm 1$		Degrees
Interaxis Alignment Error			$\pm 0.1$		Degrees
Cross-Axis Sensitivity <sup>1</sup>			$\pm 1$		%
<b>SENSITIVITY (RATIOMETRIC)<sup>2</sup></b>					
Sensitivity at $X_{OUT}$ , $Y_{OUT}$ , $Z_{OUT}$	$V_S = 3\text{ V}$	270	300	330	mV/g
Sensitivity Change Due to Temperature <sup>3</sup>	$V_S = 3\text{ V}$		$\pm 0.01$		%/°C
<b>ZERO g BIAS LEVEL (RATIOMETRIC)</b>					
0 g Voltage at $X_{OUT}$ , $Y_{OUT}$	$V_S = 3\text{ V}$	1.35	1.5	1.65	V
0 g Voltage at $Z_{OUT}$	$V_S = 3\text{ V}$	1.2	1.5	1.8	V
0 g Offset vs. Temperature			$\pm 1$		mg/°C
<b>NOISE PERFORMANCE</b>					
Noise Density $X_{OUT}$ , $Y_{OUT}$			150		$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ rms
Noise Density $Z_{OUT}$			300		$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ rms
<b>FREQUENCY RESPONSE<sup>4</sup></b>					
Bandwidth $X_{OUT}$ , $Y_{OUT}$ <sup>5</sup>	No external filter		1600		Hz
Bandwidth $Z_{OUT}$ <sup>5</sup>	No external filter		550		Hz
$R_{IN}$ Tolerance			$32 \pm 15\%$		k $\Omega$
Sensor Resonant Frequency			5.5		kHz
<b>SELF-TEST<sup>6</sup></b>					
Logic Input Low			+0.6		V
Logic Input High			+2.4		V
ST Actuation Current			+60		$\mu\text{A}$
Output Change at $X_{OUT}$	Self-Test 0 to Self-Test 1	-150	-325	-600	mV
Output Change at $Y_{OUT}$	Self-Test 0 to Self-Test 1	+150	+325	+600	mV
Output Change at $Z_{OUT}$	Self-Test 0 to Self-Test 1	+150	+550	+1000	mV
<b>OUTPUT AMPLIFIER</b>					
Output Swing Low	No load		0.1		V
Output Swing High	No load		2.8		V
<b>POWER SUPPLY</b>					
Operating Voltage Range		1.8		3.6	V
Supply Current	$V_S = 3\text{ V}$		350		$\mu\text{A}$
Turn-On Time <sup>7</sup>	No external filter		1		ms
<b>TEMPERATURE</b>					
Operating Temperature Range		-40		+85	°C

<sup>1</sup> Defined as coupling between any two axes.

<sup>2</sup> Sensitivity is essentially ratiometric to  $V_S$ .

<sup>3</sup> Defined as the output change from ambient-to-maximum temperature or ambient-to-minimum temperature.

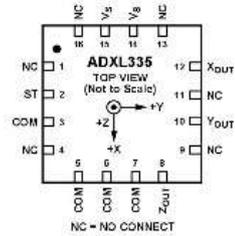
<sup>4</sup> Actual frequency response controlled by user-supplied external filter capacitors ( $C_X$ ,  $C_Y$ ,  $C_Z$ ).

<sup>5</sup> Bandwidth with external capacitors =  $1/2 \times \pi \times 32\text{ k}\Omega \times C_i$ . For  $C_X$ ,  $C_Y = 0.003\ \mu\text{F}$ , bandwidth = 1.6 kHz. For  $C_Z = 0.01\ \mu\text{F}$ , bandwidth = 500 Hz. For  $C_X$ ,  $C_Y = 10\ \mu\text{F}$ , bandwidth = 0.5 Hz.

<sup>6</sup> Self-test response changes cubically with  $V_S$ .

<sup>7</sup> Turn-on time is dependent on  $C_X$ ,  $C_Y$ ,  $C_Z$  and is approximately  $160 \times C_X$  or  $C_Y$  or  $C_Z = 1\text{ ms}$ , where  $C_X$ ,  $C_Y$ ,  $C_Z$  are in microfarads ( $\mu\text{F}$ ).

## PIN CONFIGURATION AND FUNCTION DESCRIPTIONS



NOTES  
 1. EXPOSED PAD IS NOT INTERNALLY CONNECTED BUT SHOULD BE SOLDERED FOR MECHANICAL INTEGRITY.

Figure 2. Pin Configuration

Table 3. Pin Function Descriptions

Pin No.	Mnemonic	Description
1	NC	No Connect. <sup>1</sup>
2	ST	Self-Test.
3	COM	Common.
4	NC	No Connect. <sup>1</sup>
5	COM	Common.
6	COM	Common.
7	COM	Common.
8	Z <sub>OUT</sub>	Z Channel Output.
9	NC	No Connect. <sup>1</sup>
10	Y <sub>OUT</sub>	Y Channel Output.
11	NC	No Connect. <sup>1</sup>
12	X <sub>OUT</sub>	X Channel Output.
13	NC	No Connect. <sup>1</sup>
14	V <sub>S</sub>	Supply Voltage (1.8 V to 3.6 V).
15	V <sub>S</sub>	Supply Voltage (1.8 V to 3.6 V).
16	NC	No Connect. <sup>1</sup>
EP	Exposed Pad	Not internally connected. Solder for mechanical integrity.

<sup>1</sup> NC pins are not internally connected and can be tied to COM pins, unless otherwise noted.

## ADXL335

### USE WITH OPERATING VOLTAGES OTHER THAN 3 V

The ADXL335 is tested and specified at  $V_S = 3\text{ V}$ ; however, it can be powered with  $V_S$  as low as 1.8 V or as high as 3.6 V. Note that some performance parameters change as the supply voltage is varied.

The ADXL335 output is ratiometric, therefore, the output sensitivity (or scale factor) varies proportionally to the supply voltage. At  $V_S = 3.6\text{ V}$ , the output sensitivity is typically 360 mV/g. At  $V_S = 2\text{ V}$ , the output sensitivity is typically 195 mV/g.

The zero  $g$  bias output is also ratiometric, thus the zero  $g$  output is nominally equal to  $V_S/2$  at all supply voltages.

The output noise is not ratiometric but is absolute in volts; therefore, the noise density decreases as the supply voltage increases. This is because the scale factor (mV/g) increases while the noise voltage remains constant. At  $V_S = 3.6\text{ V}$ , the X-axis and Y-axis noise density is typically  $120\text{ }\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ , whereas at  $V_S = 2\text{ V}$ , the X-axis and Y-axis noise density is typically  $270\text{ }\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ .

Self-test response in  $g$  is roughly proportional to the square of the supply voltage. However, when ratiometricity of sensitivity is factored in with supply voltage, the self-test response in volts is roughly proportional to the cube of the supply voltage. For example, at  $V_S = 3.6\text{ V}$ , the self-test response for the ADXL335 is approximately -560 mV for the X-axis, +560 mV for the Y-axis, and +950 mV for the Z-axis.

At  $V_S = 2\text{ V}$ , the self-test response is approximately -96 mV for the X-axis, +96 mV for the Y-axis, and -163 mV for the Z-axis.

The supply current decreases as the supply voltage decreases. Typical current consumption at  $V_S = 3.6\text{ V}$  is 375  $\mu\text{A}$ , and typical current consumption at  $V_S = 2\text{ V}$  is 200  $\mu\text{A}$ .

### AXES OF ACCELERATION SENSITIVITY

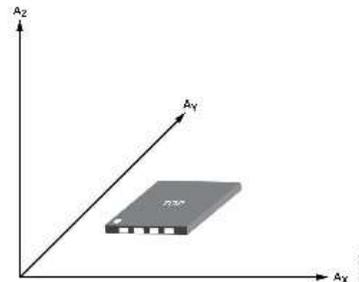


Figure 23. Axes of Acceleration Sensitivity: Corresponding Output Voltage Increases When Accelerated Along the Sensitive Axis.

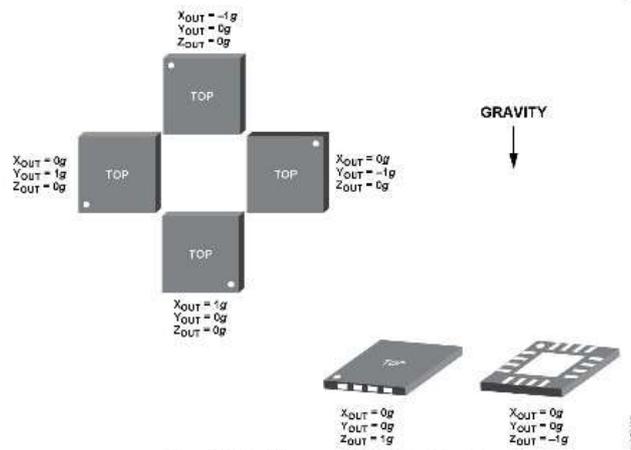


Figure 24. Output Response vs. Orientation to Gravity

## SPECIFICATIONS

# USB-6009

8 AI (14-Bit, 48 kS/s), 2 AO (150 Hz), 13 DIO USB Multifunction I/O Device

## Definitions

---

*Warranted* specifications describe the performance of a model under stated operating conditions and are covered by the model warranty.

The following characteristic specifications describe values that are relevant to the use of the model under stated operating conditions but are not covered by the model warranty.

- *Typical* specifications describe the performance met by a majority of models.
- *Nominal* specifications describe an attribute that is based on design, conformance testing, or supplemental testing.

Specifications are *Typical* unless otherwise noted.

## Conditions

---

Specifications are valid at 25 °C unless otherwise noted.

## Analog Input

---

Analog inputs

Differential	4
Single-ended	8, software-selectable
Input resolution	
Differential	14 bits
Single-ended	13 bits
Maximum sample rate (aggregate)	48 kS/s, system dependent
Converter type	Successive approximation
AI FIFO	512 bytes
Timing resolution	41.67 ns (24 MHz timebase)

Pull-up resistor	4.7 k $\Omega$ to 5 V
Power-on state	Input

**Table 3.** Digital Logic Levels

Level	Minimum	Maximum
Input low voltage	-0.3 V	0.8 V
Input high voltage	2.0 V	5.8 V
Input leakage current	—	50 $\mu$ A
Output low voltage (I = 8.5 mA)	—	0.8 V
Output high voltage, active drive (I = -8.5 mA)	2.0 V	3.5 V
Output high voltage, open collector (I = -0.6 mA, nominal)	2.0 V	5.0 V
Output high voltage, open collector (I = -8.5 mA, with external pull-up resistor)	2.0 V	—

## External Voltage

+5 V output (200 mA maximum)

Minimum	+4.85 V
Typical	+5 V

+2.5 V output (1 mA maximum)

+2.5 V

+2.5 V accuracy

0.25% maximum

Reference temperature drift

50 ppm/ $^{\circ}$ C maximum

## Event Counter

Number of counters	1
Resolution	32 bits
Counter measurements	Edge counting (falling-edge)
Counter direction	Count up
Pull-up resistor	4.7 k $\Omega$ to 5 V
Maximum input frequency	5 MHz
Minimum high pulse width	100 ns
Minimum low pulse width	100 ns

Input high voltage	2.0 V
Input low voltage	0.8 V

## Bus Interface

USB specification	USB 2.0 full-speed (12 Mb/s)
-------------------	------------------------------

## Power Requirements

USB, 4.10 VDC to 5.25 VDC

Typical	80 mA
Maximum	500 mA

USB suspend

Typical	300 $\mu$ A
Maximum	500 $\mu$ A

## Physical Characteristics

Dimensions

Without connectors	63.5 mm $\times$ 85.1 mm $\times$ 23.2 mm (2.50 in. $\times$ 3.35 in. $\times$ 0.91 in.)
With connectors	81.8 mm $\times$ 85.1 mm $\times$ 23.2 mm (3.22 in. $\times$ 3.35 in. $\times$ 0.91 in.)

Weight

Without connectors	54 g (1.9 oz)
With connectors	84 g (3 oz)

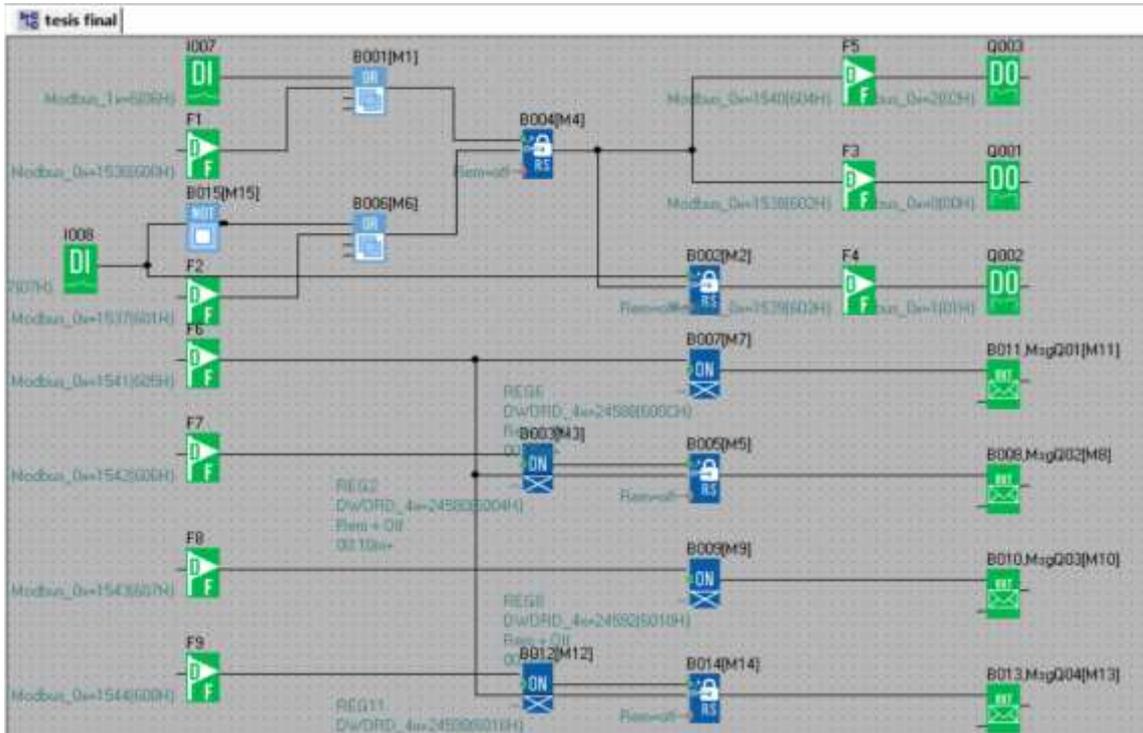
USB connector	USB series B receptacle (1)
---------------	-----------------------------

I/O connectors

Type	16-position screw terminal plugs (2)
Screw-terminal wiring	16 AWG to 28 AWG
Torque for screw terminals	0.22 N $\cdot$ m to 0.25 N $\cdot$ m (2.0 lb $\cdot$ in. to 2.2 lb $\cdot$ in.)

If you need to clean the module, wipe it with a dry towel.

## Anexo G: Programación del PLC RIEVTECH



Number	Name	Phone Number/email address
01		
02	PLC	+59399999999
03		
04		
05		
06		
07		
08		
09		
10		
11		
12		
13		
14		
<		

Buttons: Add, Edit, Delete, OK, Cancel

Sms Out | Sms Dial | Sms email

Block name:

Message Format: TEXT

Text Message  Parana Message

Message Editor

1#1

Remaining chars for message (Max. 100 chars)

Confirmation

Waiting for confirmation  Minute

Number of loops if no confirmation received  Repetitions

Send status message to

1.Receiver RECEPTOR,+593969075131

2.Receiver

3.Receiver

4.Receiver

5.Receiver

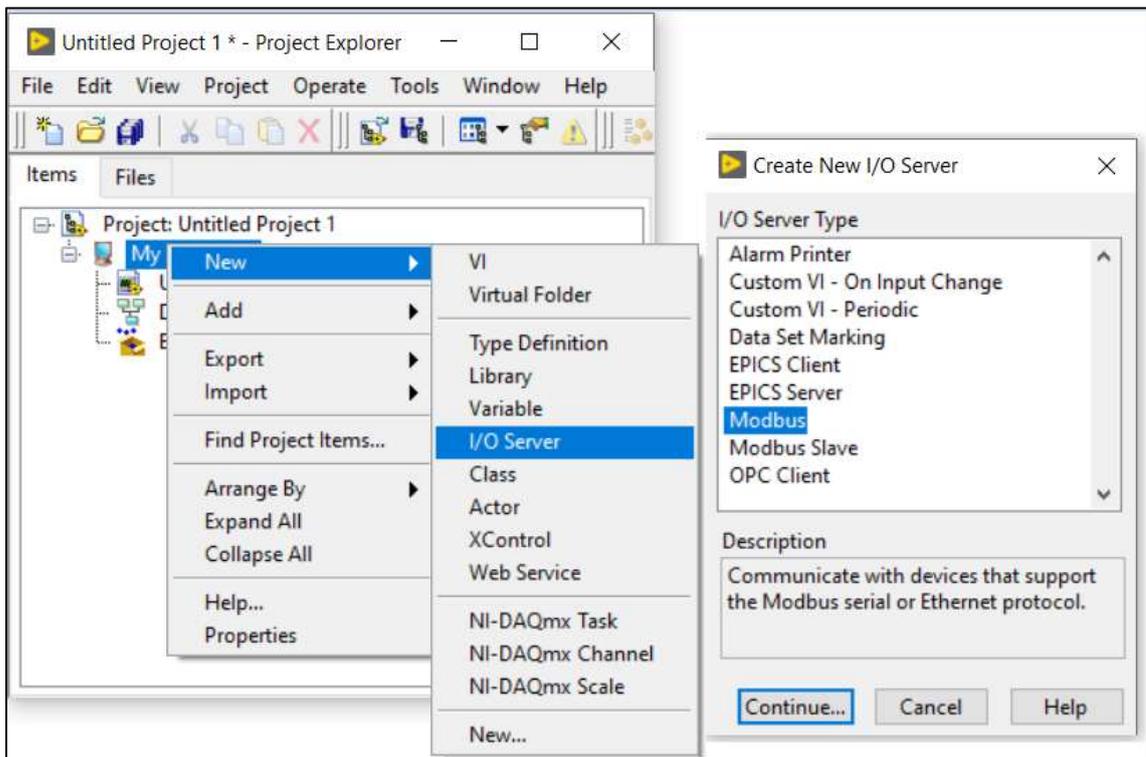
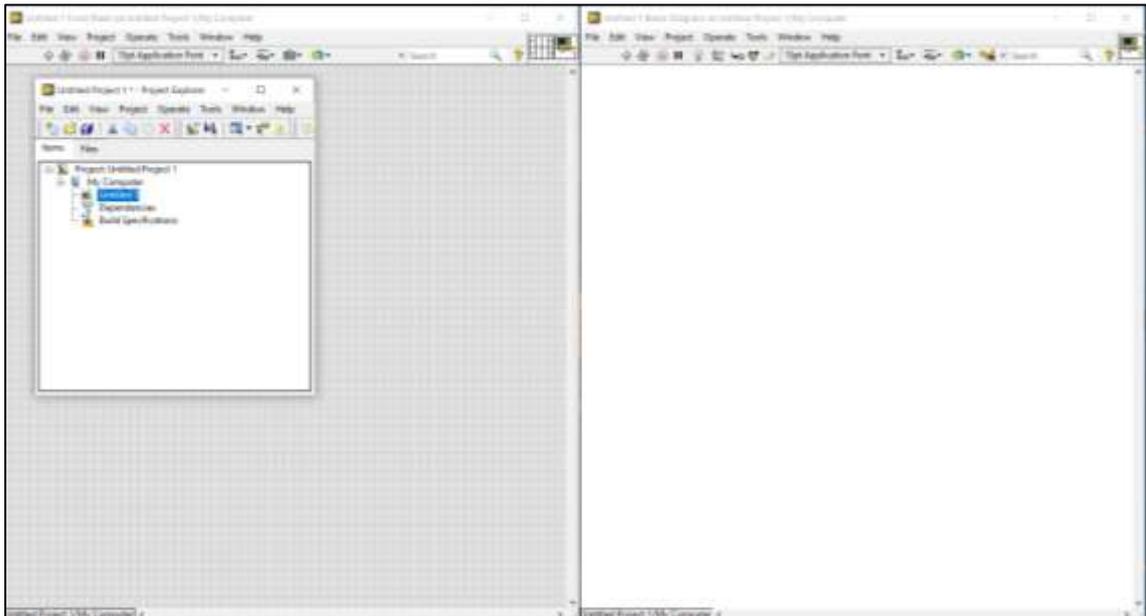
On message delay(SMS send only if input is continuous HIGH during the set time )

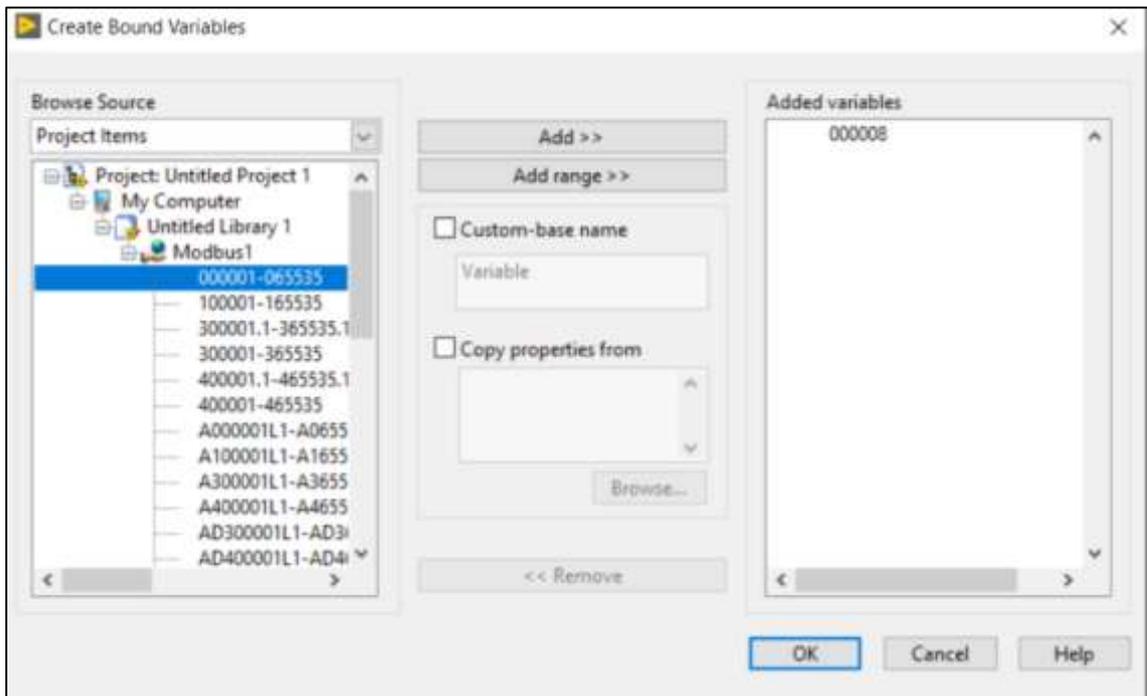
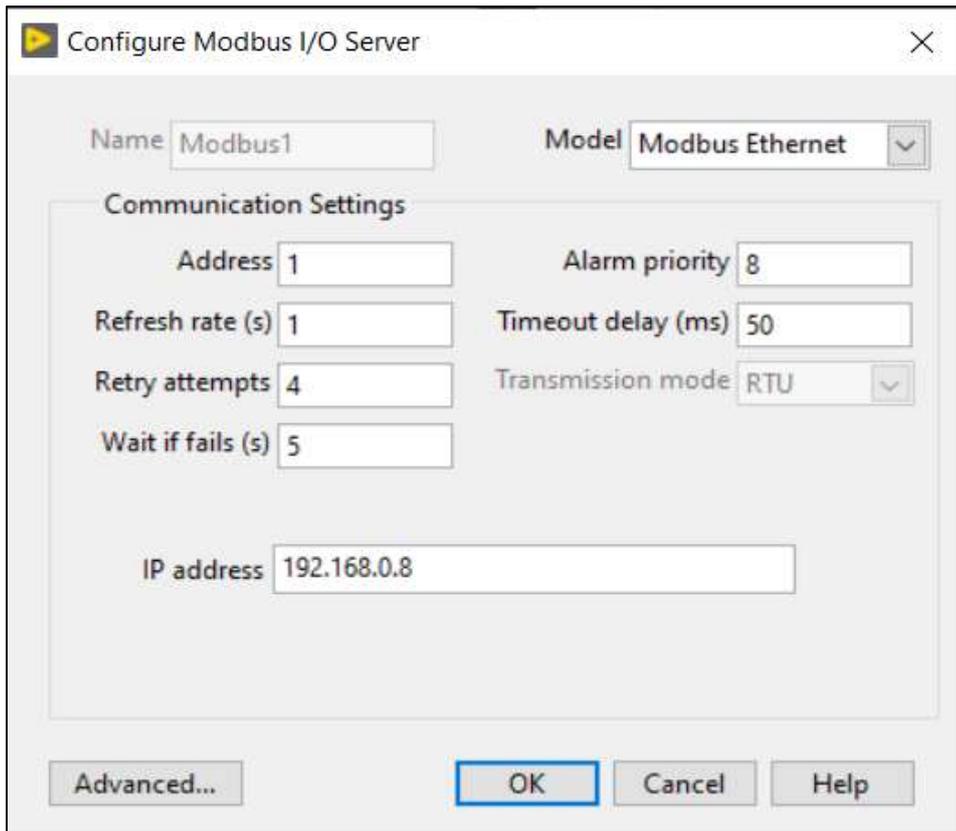
(0.01...99.99)  s  m  h

Keyword for confirmation

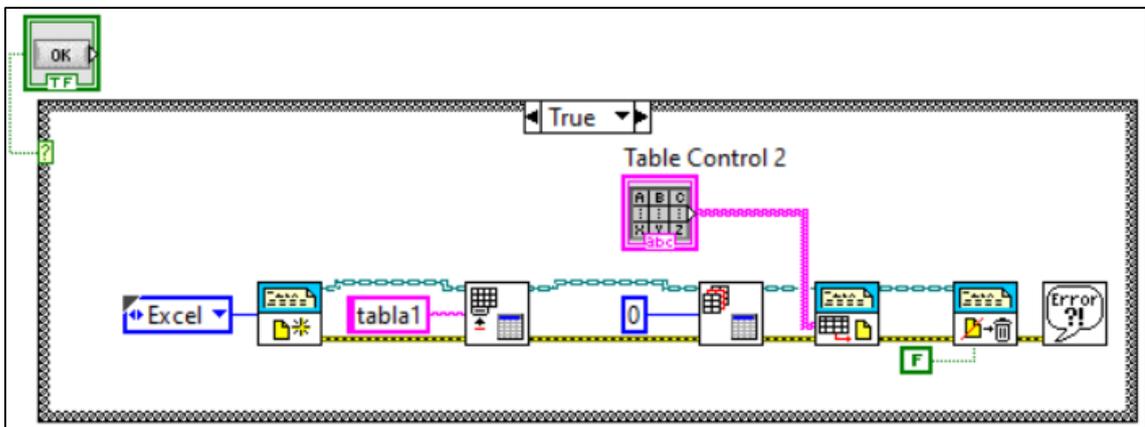
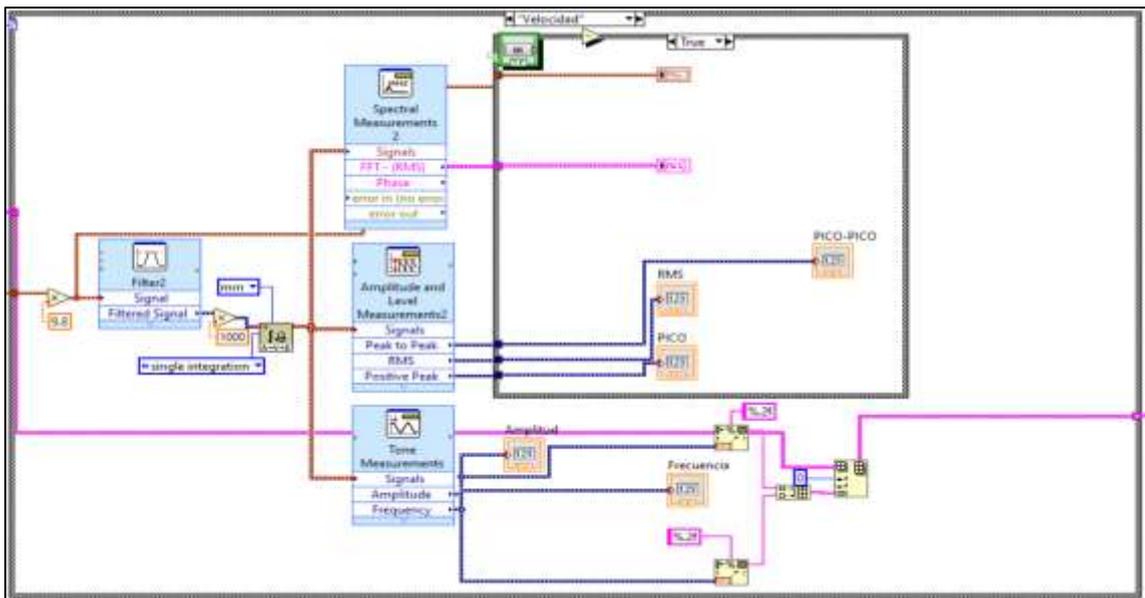
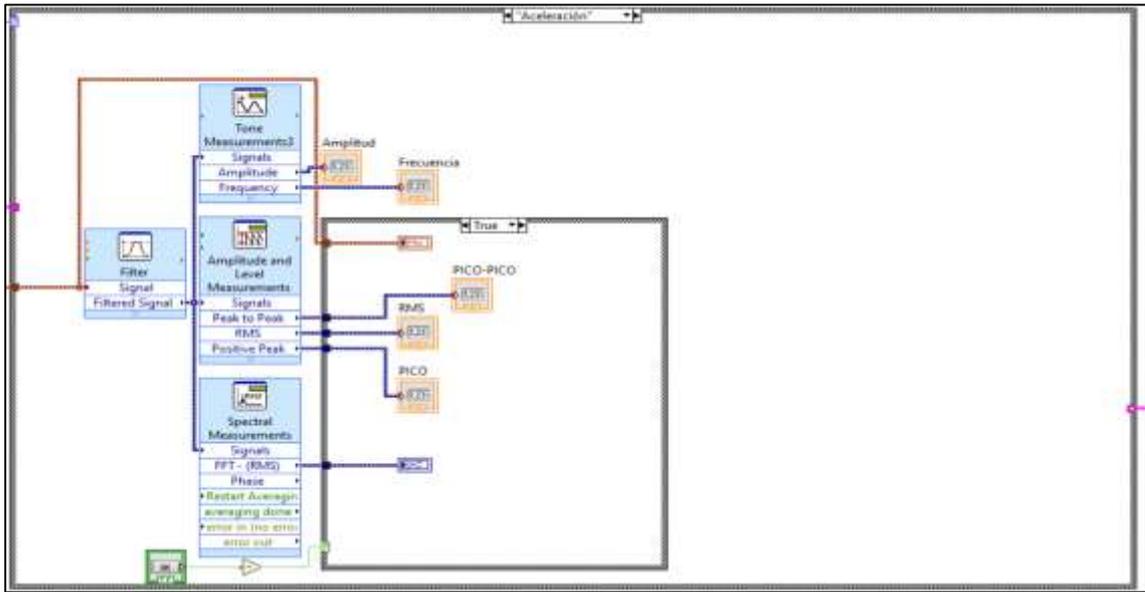
If not selected no keyword needed for confirmation,Confirmation by identification of senders phone number(any or no message text)

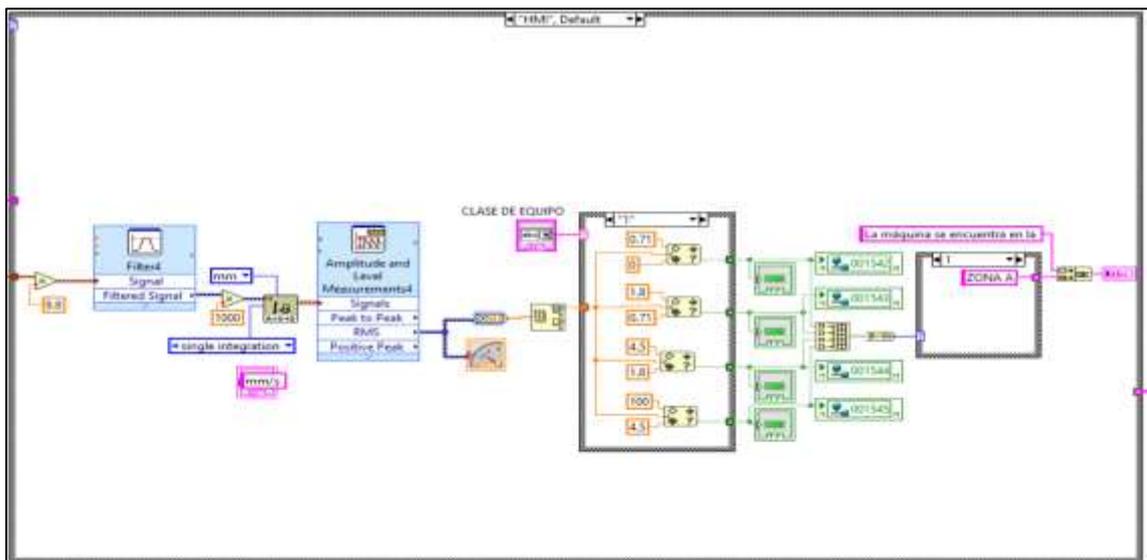
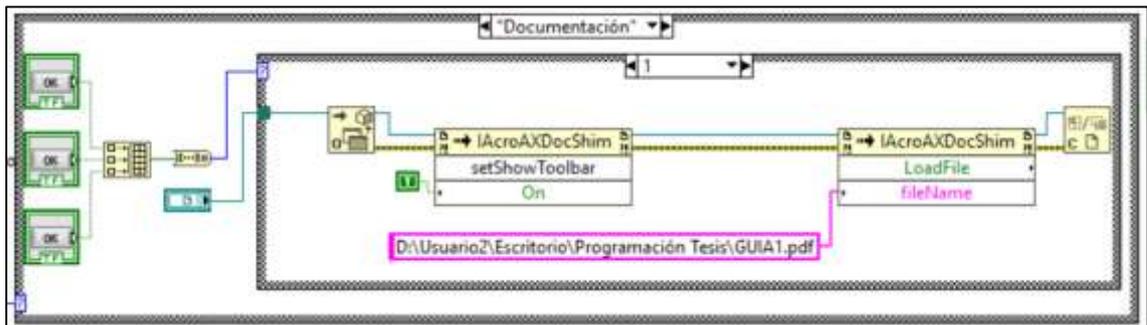
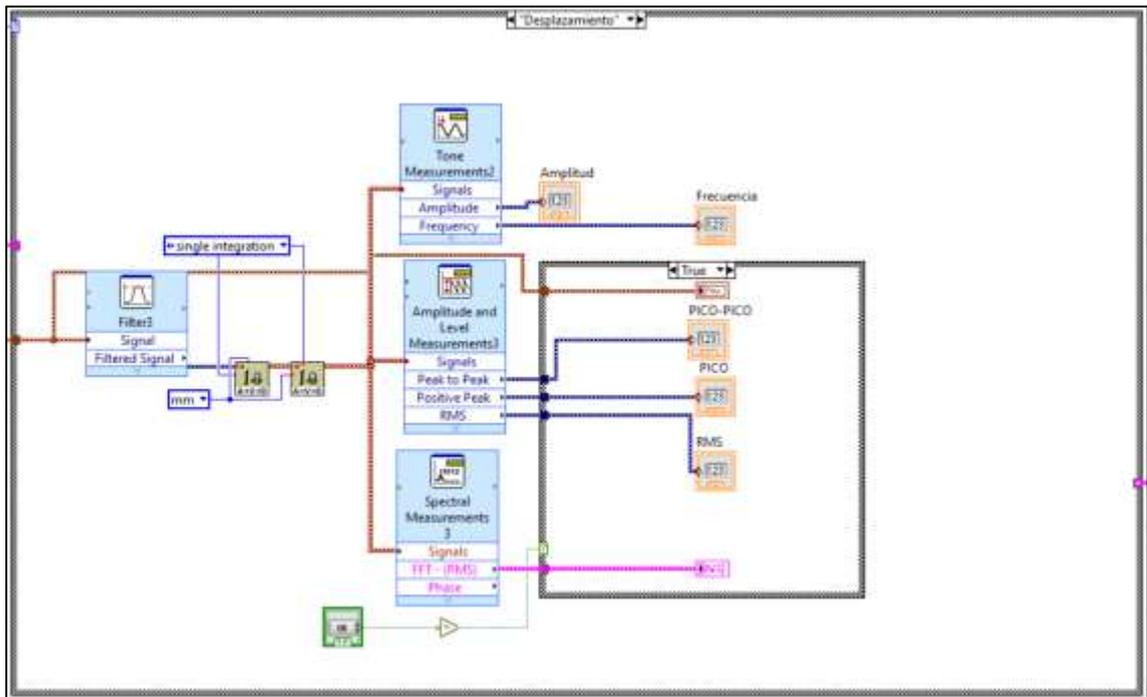
## Anexo H: Configuración MODBUS TCP





# Anexo I: Programación de la interfaz en LabVIEW





## Anexo J: Guía de usuario del sistema Predictive Vibration Analysis

# PREDICTIVE VIBRATIONAL ANALYSIS

## MANUAL DE USUARIO

Acceleración | Velocidad | Desplazamiento | Documentación



### PREDICTIVE VIBRATIONAL ANALYSIS



#### NIVEL DE VIBRACIÓN

CLASE DE EQUIPO:

#### TABLERO DE CONTROL

INICIO PARO



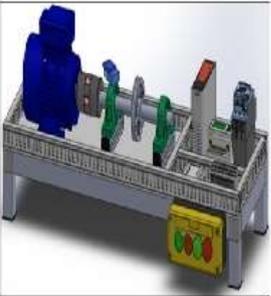
EJECUTAR



#### EVALUACIÓN DE SEVERIDAD

- A: Máquina nueva recién puesta en marcha
- B: Máquinas que pueden funcionar indefinidamente sin restricciones
- C: Máquina no satisfactoria para operación continua de largo plazo
- D: Los valores de vibración son peligrosos, la máquina puede sufrir daños

#### BANCO DE PRUEBAS



DETERNER

## **PREPARACIÓN DE LOS ELEMENTOS HARDWARE**

### **1. Conexión del cable de poder a la toma de corriente**

- Encender los interruptores termomagnéticos, para alimentar a la fuente de corriente directa.
- Observar que se encienda la luz piloto de color rojo, la cual indica que el sistema esta energizado de forma correcta.

### **2. Conexión del módulo de adquisición de datos NI 6009 al computador**

- Colocar el módulo de adquisición de datos en el espacio libre del banco de pruebas.
- Conectar desde el puerto NI 6009 a un puerto USB del computador mediante el cable de comunicación de datos.

### **3. Conexión del acelerómetro ADXL 335 al módulo de adquisición de datos NI 6009**

- Conectar la salida analógica del acelerómetro a la entrada AI6, pin 9, de la tarjeta de adquisición de datos NI 6009, de igual manera energizar al sensor con el voltaje que proporciona la tarjeta con su respectiva referencia de Ground.

## **PREPARACIÓN PARA ADQUIRIR LOS DATOS**

### **Abrir la aplicación ejecutable Predictive Vibrational Analysis**

- Por defecto la aplicación se abrirá en la pantalla principal del sistema, si se desea obtener los niveles de vibración en las diferentes unidades de aceleración, velocidad o desplazamiento, solo se debe cambiar de pestaña antes de empezar o durante la medición. De igual manera hay una pestaña llamada documentación donde se puede encontrar las normas utilizadas para realizar el respectivo diagnóstico del sistema y manual de usuario.

### **Encender el motor del banco de pruebas**

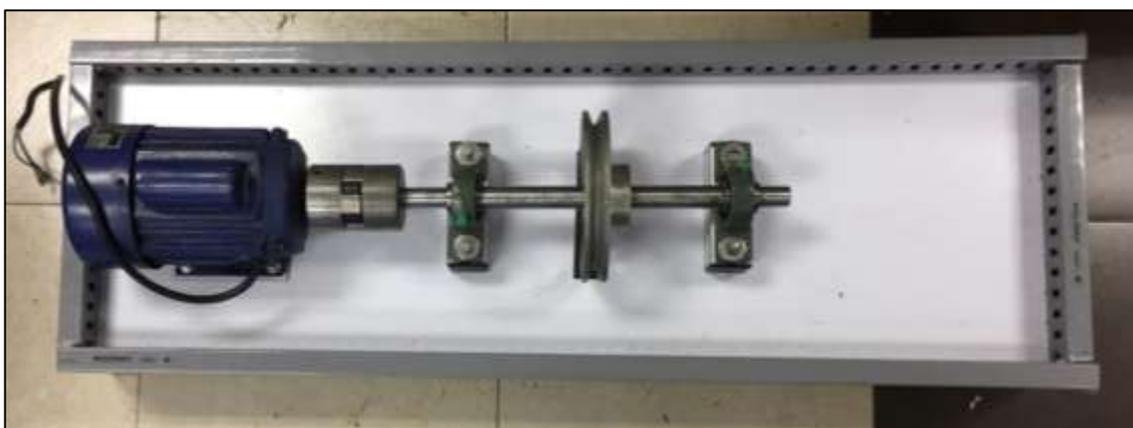
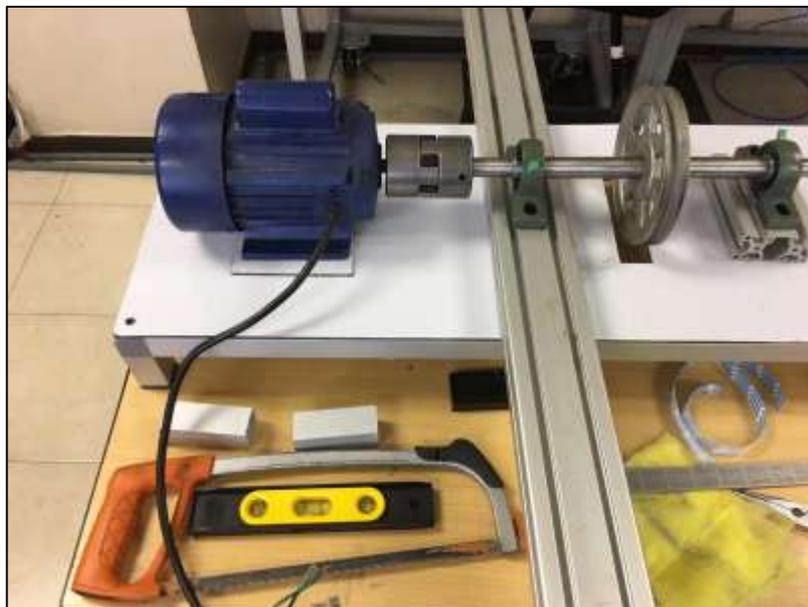
- Manualmente se puede encender el motor desde la botonera del banco de prueba, presionando el pulsador de color verde y para detener el motor se presiona el pulsador de color rojo.

- Mediante el HMI de la aplicación se puede realizar el mismo proceso, presionando los pulsadores del tablero de control.

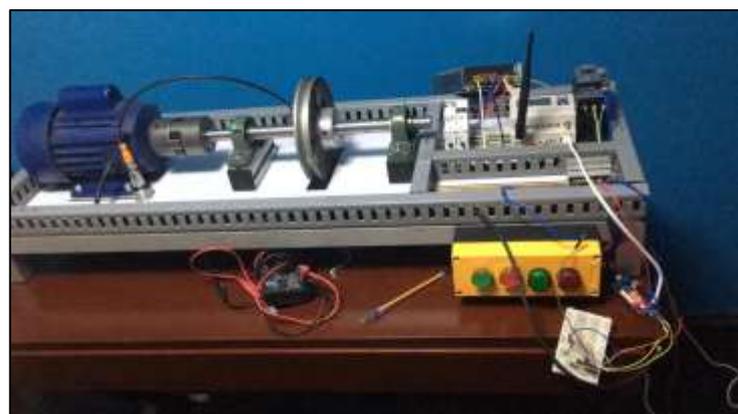
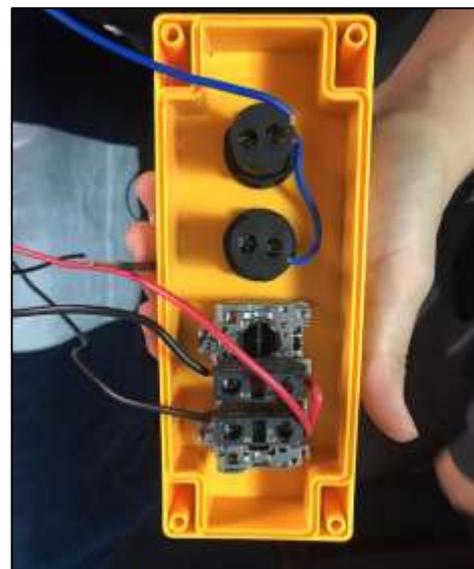
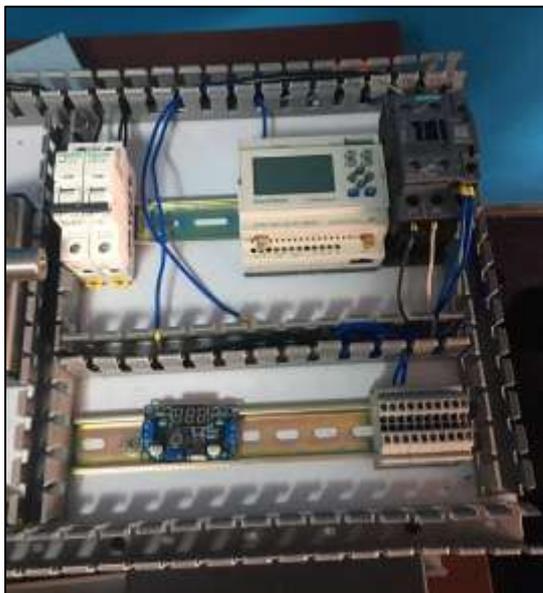
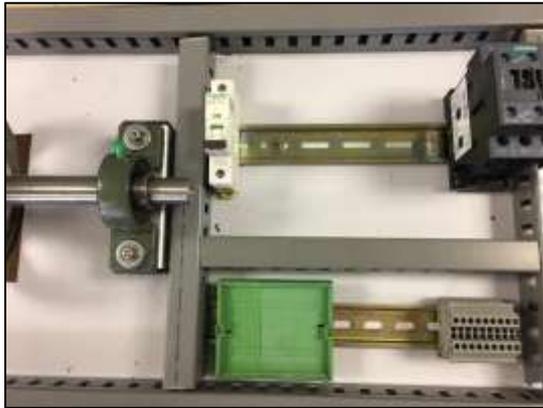
#### **ADQUISICIÓN DE DATOS**

- Para empezar adquirir los datos se debe presionar el botón Ejecutar en cualquiera de las pestañas. En la pantalla principal en el apartado de Nivel de vibración se podrá observar varios indicadores, en los que se encuentra el nivel de vibración RMS global, un cuadro donde aparecerá la zona de severidad que se encuentra el motor y un indicador representando el color de la severidad de la vibración de acuerdo con la norma ISO 2372. De igual manera se debe elegir la clase de equipo (Motor) que se esté realizando las mediciones en base a la norma ya mencionada. Por último se enviará un mensaje de texto al número de la persona que se encuentre en el directorio de datos de teléfono del PLC, cada vez que se actualice los valores del nivel de severidad, o se regrese a la pestaña principal de las otras pestañas.
- Para observar los espectros y los indicadores de las variables de las otras unidades se debe cambiar de pestaña, donde se podrá observar dos pulsadores adicionales, el primero de pausar es para congelar los datos y las gráficas y poder analizar detenidamente las mismas. En las tres pestañas se puede realizar lo antes mencionado, a diferencia de la pestaña de velocidad donde se encontrará un pulsador extra donde se podrá guardar los datos de la medición en un archivo Excel.

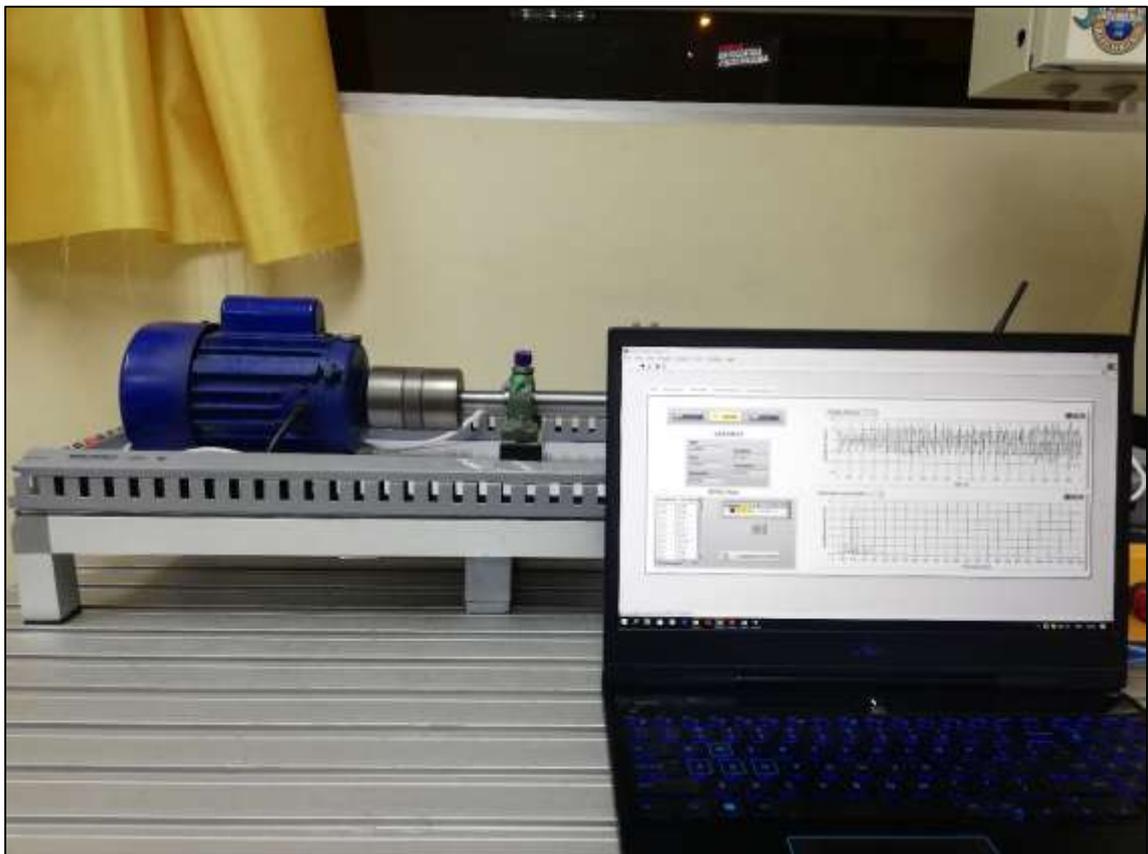
**Anexo K:** Montaje de los elementos mecánicos del banco de pruebas



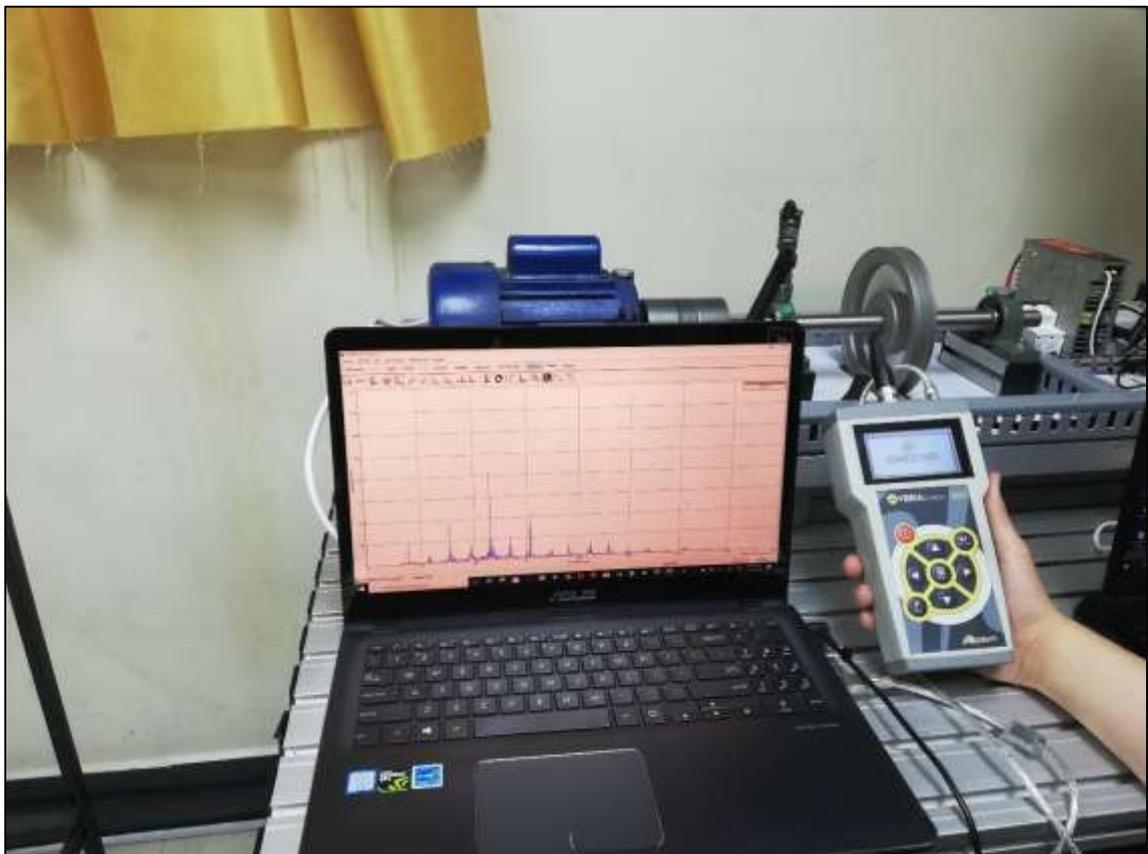
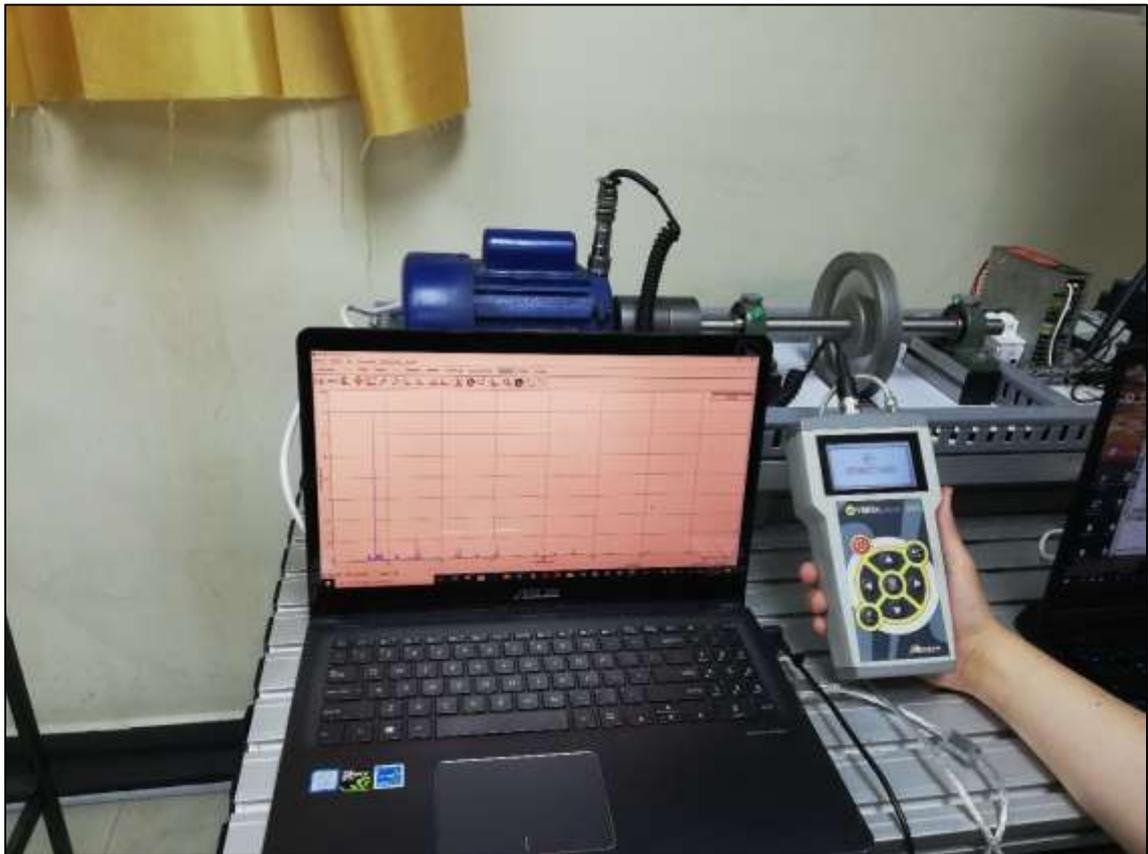
**Anexo L:** Montaje y conexión de los elementos eléctricos/electrónicos del banco de pruebas



**Anexo M: Pruebas realizadas con el sistema Predictive Vibration Analysis**



**Anexo N:** Pruebas realizadas con el equipo VIBRAcheck 200





**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE  
CHIMBORAZO**



**DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS  
PARA EL APRENDIZAJE Y LA INVESTIGACIÓN**

**UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS  
REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA**

**Fecha de entrega:** 06 / 12 / 2019

<b>INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)</b>
<b>Nombres – Apellidos:</b> Jefferson Patricio Toapanta Granizo Luis Eduardo Fernández Romero
<b>INFORMACIÓN INSTITUCIONAL</b>
<b>Facultad:</b> Facultad de Informática y Electrónica
<b>Carrera:</b> Ingeniería Electrónica Control y Redes Industriales
<b>Título a optar:</b> Ingeniero en Electrónica Control y Redes Industriales
<b>f. Analista de bibliotecas responsable:</b>