



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

**“ESTUDIO DE LA CONFIANZA DE LA MEDICIÓN DE LA
VIBRACIÓN RADIAL CON DISTINTOS ÁNGULOS DE
UBICACIÓN DEL SENSOR”**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

AUTOR:

WILIAM RODRIGO OROZCO CASTILLO

Riobamba – Ecuador

2024



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

**“ESTUDIO DE LA CONFIANZA DE LA MEDICIÓN DE LA
VIBRACIÓN RADIAL CON DISTINTOS ÁNGULOS DE
UBICACIÓN DEL SENSOR”**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

AUTOR: WILIAM RODRIGO OROZCO CASTILLO

DIRECTOR: ING. EDUARDO SEGUNDO HERNÁNDEZ DÁVILA

Riobamba – Ecuador

2024

© 2024, **Wiliam Rodrigo Orozco Castillo**

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.

Yo, Wiliam Rodrigo Orozco Castillo, declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 09 de mayo de 2024

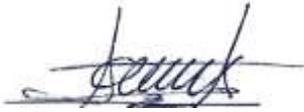


Wiliam Rodrigo Orozco Castillo

0604348433

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto de Investigación, “**ESTUDIO DE LA CONFIANZA DE LA MEDICIÓN DE LA VIBRACIÓN RADIAL CON DISTINTOS ÁNGULOS DE UBICACIÓN DEL SENSOR**”, realizado por el señor: **WILIAM RODRIGO OROZCO CASTILLO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Marco Antonio Ordóñez Viñán PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2024-05-09
Ing. Eduardo Segundo Hernández Dávila DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2024-05-09
Ing. Fausto Ulpiano Caicedo Benavides ASESOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2024-05-09

DEDICATORIA

A mis padres Rodrigo Orozco y Laura Castillo que me apoyaron en todo el proceso de mi formación académica con su amor incondicional, consejos y su ejemplo de lucha y trabajo constante, a mis hermanos Laura, Juan, y Ángel por su infinita comprensión y paciencia su actitud noble y su apoyo me han acompañado y fortalecido a lo largo de este camino, a mi abuelito Mesías Castillo que fue quien estuvo al inicio y me llevó a mis primeros días de clases, por sus enseñanzas y por hacerme un hombre valiente y con un corazón noble, siempre estás en mis pensamientos y sé que desde el cielo me cuidas y proteges como lo hacías en vida, a mi abuelita Julia Sánchez, cuya fe inquebrantable y constantes oraciones me han protegido y me han ayudado a mantenerme enfocado y perseverante en mis estudios, su devoción ha sido una bendición constante en mi vida y en mi camino académico.

Wiliam

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por brindarme la fortaleza y sabiduría necesaria para enfrentar todas las situaciones en que la vida me ha puesto a prueba estoy seguro que con su bendición seguiré adelante cumpliendo mis metas y sueños. A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo a la Facultad de Mecánica y de manera muy especial a mi querida carrera de Mantenimiento Industrial porque ha sido mi segundo hogar durante estos años de estudios y en donde he vivido cosas que siempre estarán presentes en mi mente y en mi corazón, a los docentes que me compartieron sus conocimientos e hicieron parte de mi formación profesional, en especial al Ing. Eduardo Hernández por su paciencia y apoyo durante el desarrollo de este trabajo tengan la seguridad que no los defraudare y que llevare con orgullo sus nombres y el de la carrera de Mantenimiento Industrial en cada paso que dé en mi trayectoria profesional.

Wiliam

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xiii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xvi
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1.	PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	2
1.1	Planteamiento del problema.....	2
1.2	Objetivos.....	2
1.2.1	<i>Objetivo general</i>	2
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	2
1.3	Justificación.....	3
1.4	Hipótesis.....	3

CAPÍTULO II

2.	MARCO TEÓRICO.....	5
2.1	Confianza de la medición.....	5
2.1.1	<i>Concepto de confianza de medición</i>	5
2.1.2	<i>Precisión y exactitud</i>	5
2.1.3	<i>Reproducibilidad</i>	6
2.1.4	<i>Repetibilidad</i>	6
2.1.5	<i>Incertidumbre</i>	6
2.2	Métodos de evaluación de la confianza de una medida.....	6
2.2.1	<i>Desviación estándar y coeficiente de variación</i>	6
2.2.2	<i>Intervalos de confianza</i>	7
2.3	Factores que afectan la confianza.....	7
2.3.1	<i>Errores sistemáticos</i>	7
2.3.1.1	<i>Calibración inadecuada</i>	7
2.3.1.2	<i>Error de paralaje</i>	7
2.3.1.3	<i>Error de cero</i>	7

2.3.2	Factores externos	7
2.3.2.1	<i>Interferencia electromagnética</i>	8
2.3.2.2	<i>Vibraciones y ruido</i>	8
2.4	Generalidades de las vibraciones	8
2.4.1	<i>Definición de vibración</i>	8
2.4.2	<i>Clasificación de las vibraciones</i>	8
2.4.2.1	<i>Vibración libre</i>	8
2.4.2.2	<i>Vibración forzada</i>	8
2.4.2.3	<i>Vibración amortiguada</i>	9
2.4.2.4	<i>Vibración no amortiguada</i>	9
2.4.2.5	<i>Vibración determinística</i>	9
2.4.2.6	<i>Vibración aleatoria</i>	9
2.4.3	<i>Medición de vibración</i>	10
2.4.4	<i>Vibración radial</i>	10
2.4.5	<i>Factores que producen vibración radial</i>	11
2.5	Transductores de medición de vibración	11
2.5.1	<i>Acelerómetro</i>	11
2.5.2	<i>Tipos de Acelerómetros</i>	11
2.5.2.1	<i>Acelerómetros piezo eléctricos</i>	11
2.5.2.2	<i>Acelerómetros piezo resistivos</i>	12
2.5.2.3	<i>Acelerómetros capacitivos</i>	12
2.5.3	<i>Funcionamiento del acelerómetro</i>	13
2.6	Magnitudes en el análisis de vibraciones	13
2.6.1	<i>Movimiento Armónico Simple</i>	13
2.6.2	<i>Periodo</i>	14
2.6.3	<i>Frecuencia</i>	14
2.6.4.	<i>Desplazamiento</i>	14
2.6.5	<i>Velocidad</i>	14
2.6.6	<i>Aceleración</i>	15
2.6.7	<i>Amplitud</i>	15
2.7	Severidad de vibraciones	16
2.7.1	<i>Norma ISO 10816-1</i>	16
2.8	Orientación del punto de medición	17

CAPÍTULO III

3.	MARCO METODOLÓGICO	19
3.1	Módulo de ensayos de vida acelerada	19
3.2	Requisitos del módulo	19
3.3	Diseño de la caja de rodamiento nueva	20
3.3.1	<i>Selección de la forma de la caja</i>	20
3.3.2	<i>Materiales y dimensiones</i>	21
3.3.3	<i>Determinación del número de superficies planas de la caja</i>	22
3.3.3.1	<i>Dimensiones del acelerómetro</i>	22
3.3.4	<i>Determinación del número de insertos en la caja</i>	24
3.3.5	<i>Simetría de la caja</i>	25
3.3.6	<i>Simulación de la caja</i>	26
3.4	Construcción de la caja	26
3.5	Montaje de la caja construida al módulo de ensayos de vida acelerada	27
3.6	Alineación del eje del módulo	27
3.6.1	<i>Montaje del VIBRO-LASER</i>	28
3.6.2	<i>Configuración del software VIBRO-LASER</i>	28
3.7	Diseño y tipo de investigación	32
3.8	Descripción del enfoque	33
3.9	Alcance	34
3.10	Métodos	34
3.11	Técnicas e instrumentos de investigación utilizadas	34
3.11.1	<i>Técnicas de investigación</i>	34
3.11.2	<i>Equipos e instrumentos de investigación</i>	35
3.12	Población y muestra	36
3.13	Población	36
3.14	Muestra	36
3.14.1.1	<i>Cálculo del tamaño de la muestra</i>	38
3.15	Recolección de datos	41
3.15.1	<i>Configuración del software MAINTraQ Predictive</i>	41
3.15.2	<i>Toma de mediciones de vibración radial</i>	50
3.15.2.1	<i>Mediciones de vibración radial a 0°</i>	50
3.15.2.2	<i>Mediciones de vibración radial a 6°</i>	54
3.15.2.3	<i>Mediciones de vibración radial a 12°</i>	57
3.15.2.4	<i>Mediciones de vibración radial a 18°</i>	60

3.15.2.5.	<i>Mediciones de vibración radial a 24°</i>	63
3.15.2.6	<i>Mediciones de vibración radial a 30°</i>	66
3.15.2.7	<i>Mediciones de vibración radial a 36°</i>	69
3.15.2.8	<i>Mediciones de vibración radial a 42°</i>	72
3.15.2.9	<i>Mediciones de vibración radial a 48°</i>	75
3.15.2.10	<i>Mediciones de vibración radial a 54°</i>	78
3.15.2.11	<i>Mediciones de vibración radial a 60°</i>	81
3.15.2.12	<i>Mediciones de vibración radial a 66°</i>	84

CAPÍTULO IV

4.	MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	87
4.1	Procesamiento, análisis e interpretación de resultados	87
4.1.1	<i>Importación de librerías a utilizar</i>	87
4.1.2	<i>Importación de datos</i>	87
4.1.3	<i>Creación de una tabla nueva (Data Frame)</i>	87
4.1.4	<i>Exploración de los primeros y últimos registros</i>	88
4.1.5	<i>Exploración informativa de un Data Frame</i>	88
4.1.6	<i>Identificación de datos atípicos</i>	89
4.1.7	<i>Tratamiento de datos atípicos</i>	90
4.1.8	<i>Verificación de la existencia de datos atípicos</i>	90
4.1.9	<i>Descripción de los datos</i>	92
4.1.10	<i>Prueba de normalidad</i>	93
4.1.11	<i>Histograma de frecuencias relativas</i>	94
4.1.12	<i>Comparación de muestras</i>	95
4.1.12.1	<i>Comparación de muestras a 0° y a 6°</i>	96
4.1.12.2	<i>Comparación de muestras a 0° y a 12°</i>	97
4.1.12.3	<i>Comparación de muestras a 0° y a 18°</i>	99
4.1.12.4	<i>Comparación de muestras a 0° y a 24°</i>	101
4.1.12.5	<i>Comparación de muestras a 0° y a 30°</i>	103
4.1.12.6	<i>Comparación de muestras a 0° y a 36°</i>	105
4.1.12.7	<i>Comparación de muestras a 0° y a 42°</i>	107
4.1.12.8	<i>Comparación de muestras a 0° y a 48°</i>	109
4.1.12.9	<i>Comparación de muestras a 0° y a 54°</i>	111
4.1.12.10	<i>Comparación de muestras a 0° y a 60°</i>	113
4.1.12.11	<i>Comparación de muestras a 0° y a 66°</i>	115

4.1.13	<i>Comprobación de la hipótesis</i>	117
---------------	--	-----

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	120
---	-----

CONCLUSIONES	120
---------------------------	-----

RECOMENDACIONES	120
------------------------------	-----

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1:	Propiedades mecánicas del acero ASTM A-36.....	21
Tabla 3-2:	Detalle de la medida de cada lado.....	23
Tabla 3-3:	Datos obtenidos de la vibración.....	37
Tabla 3-4:	Datos obtenidos por el vibracheck a 0°.....	53
Tabla 3-5:	Datos obtenidos por el vibracheck a 6°.....	56
Tabla 3-6:	Datos obtenidos por el vibracheck a 12°.....	59
Tabla 3-7:	Datos obtenidos por el vibracheck a 18°.....	62
Tabla 3-8:	Datos obtenidos por el vibracheck a 24°.....	65
Tabla 3-9:	Datos obtenidos por el vibracheck a 30°.....	68
Tabla 3-10:	Datos obtenidos por el vibracheck a 36°.....	71
Tabla 3-11:	Datos obtenidos por el vibracheck a 42°.....	74
Tabla 3-12:	Datos obtenidos por el vibracheck a 48°.....	77
Tabla 3-13:	Datos obtenidos por el vibracheck a 54°.....	80
Tabla 3-14:	Datos obtenidos por el vibracheck a 60°.....	83
Tabla 3-15:	Datos obtenidos por el vibracheck a 66°.....	86
Tabla 4-1:	Comparación de muestras dos colas.....	117
Tabla 4-2:	Comparación de muestras cola izquierda.....	118

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2-1: Precisión y exactitud.....	5
Ilustración 2-2: Vibración determinística.....	9
Ilustración 2-3: Vibración determinística.....	10
Ilustración 2-4: Esquema de medición de vibración	10
Ilustración 2-5: Acelerómetro piezoeléctrico	11
Ilustración 2-6: Acelerómetro piezoresistivo	12
Ilustración 2-7: Acelerómetro capacitivo	12
Ilustración 2-8: Movimiento armónico simple	13
Ilustración 2-9: Valores de severidad de vibración	17
Ilustración 2-10: Orientaciones del punto de medición.....	18
Ilustración 3-1: Módulo de ensayos de vida acelerada.....	19
Ilustración 3-2: Caja actual del módulo	20
Ilustración 3-3: Diseño de la caja actual del módulo	21
Ilustración 3-4: Acelerómetro	22
Ilustración 3-5: División de caja	23
Ilustración 3-6: Insertos en la caja.....	24
Ilustración 3-7: Compartimento del rodamiento	25
Ilustración 3-8: Diseño final de la caja.....	25
Ilustración 3-9: Impresión 3D	26
Ilustración 3-10: Construcción de la caja	26
Ilustración 3-11: Montaje de la caja.....	27
Ilustración 3-12: Equipo de alineación láser	27
Ilustración 3-13: Montaje del vibro láser	28
Ilustración 3-14: Menú principal del software vibro laser	29
Ilustración 3-15: Selección del rango de rpm.....	29
Ilustración 3-16: Configuración de longitudes en el vibro laser	30
Ilustración 3-17: Movimiento de los sensores del vibro laser	30
Ilustración 3-18: Reporte de desalineación	31
Ilustración 3-19: Asistente de alineación	31
Ilustración 3-20: Reporte de alineación.....	32
Ilustración 3-21: VIBRACHECK 200 ABG.....	35
Ilustración 3-22: Acelerómetro piezoeléctrico	35
Ilustración 3-23: Menú principal software MAINTraQ Predictive.....	36

Ilustración 3-24: Diagrama de cajas de la muestra.....	40
Ilustración 3-25: Creación de la base de datos	42
Ilustración 3-26: Bases de datos creadas por cada posición.....	42
Ilustración 3-27: Creación de carpeta en la base de datos.....	43
Ilustración 3-28: Creación de máquina en la carpeta	43
Ilustración 3-29: Especificaciones técnicas de la máquina	44
Ilustración 3-30: Creación del punto de vibración radial	44
Ilustración 3-31: Parámetros del punto de vibración.....	45
Ilustración 3-32: Creación de la forma de onda	45
Ilustración 3-33: Configuración de las propiedades de la forma de onda	46
Ilustración 3-34: Creación de forma de onda para aceleración y envolvente.....	46
Ilustración 3-35: Creación del espectro.....	47
Ilustración 3-36: Propiedades del espectro.....	47
Ilustración 3-37: Creación del espectro de aceleración y envolvente	48
Ilustración 3-38: Envío de datos.....	48
Ilustración 3-39: Envío de datos al colector.....	49
Ilustración 3-40 : Datos enviados correctamente	49
Ilustración 3-41: Medición a 0°.....	50
Ilustración 3-42: Lectura de datos.....	51
Ilustración 3-43: Recepción de datos	51
Ilustración 3-44: Espectro de velocidad tomada a 0°	52
Ilustración 3-45: Mediciones de velocidad de vibración tomadas a 0°	52
Ilustración 3-46: Mediciones a 6°	54
Ilustración 3-47: Espectro de velocidad de vibración tomada a 6°	55
Ilustración 3-48: Mediciones de velocidad de vibración tomadas a 6°	55
Ilustración 3-49: Mediciones a 12°	57
Ilustración 3-50: Espectro de velocidad de vibración tomada a 12°	58
Ilustración 3-51: Mediciones de velocidad de vibración tomadas a 12°	58
Ilustración 3-52: Mediciones a 18°	60
Ilustración 3-53: Espectro de velocidad de vibración tomada a 18°	61
Ilustración 3-54: Mediciones de velocidad de vibración tomadas a 18°	61
Ilustración 3-55: Mediciones a 24°	63
Ilustración 3-56: Espectro de velocidad de vibración tomada a 24°	64
Ilustración 3-57: Mediciones de velocidad de vibración tomadas a 24°	64
Ilustración 3-58: Mediciones a 30°	66
Ilustración 3-59: Espectro de velocidad de vibración tomada a 30°	67

Ilustración 3-60: Mediciones de velocidad de vibración tomadas a 30°	67
Ilustración 3-61: Mediciones a 36°	69
Ilustración 3-62: Espectro de velocidad de vibración tomada a 36°	70
Ilustración 3-63: Mediciones de velocidad de vibración tomadas a 36°	70
Ilustración 3-64: Mediciones a 42°	72
Ilustración 3-65: Espectro de velocidad de vibración tomada a 42°	73
Ilustración 3-66: Mediciones de velocidad de vibración tomadas a 42°	73
Ilustración 3-67: Mediciones a 48°	75
Ilustración 3-68: Espectro de velocidad de vibración tomada a 48°	76
Ilustración 3-69: Mediciones de velocidad de vibración tomadas a 48°	76
Ilustración 3-70: Mediciones a 54°	78
Ilustración 3-71: Espectro de velocidad de vibración tomada a 54°	79
Ilustración 3-72: Mediciones de velocidad de vibración tomadas a 54°	79
Ilustración 3-73: Mediciones a 60°	81
Ilustración 3-74: Espectro de velocidad de vibración tomada a 60°	82
Ilustración 3-75: Mediciones de velocidad de vibración tomadas a 60°	82
Ilustración 3-76: Mediciones a 66°	84
Ilustración 3-77: Espectro de velocidad de vibración tomada a 66°	85
Ilustración 3-78: Mediciones de velocidad de vibración tomadas a 66°	85

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: PLANO CAJA DE RODAMIENTO

RESUMEN

Las organizaciones que realizan análisis de vibraciones enfrentan un desafío cuando se trata de medir la vibración radial en equipos con diseños que no permiten una colocación perfectamente horizontal o vertical del sensor, por lo que se ven obligadas a realizar mediciones con ciertas variaciones angulares. Se plantea la incertidumbre de si estas mediciones reflejan la realidad o si son inexactas, por lo tanto, el objetivo del presente trabajo de investigación fue determinar la influencia del ángulo de inclinación del sensor en la confianza de la medición radial de vibraciones. Para esto se diseñó, construyó y adaptó una nueva caja de rodamiento al módulo de ensayos de vida acelerada que se encuentra en el Laboratorio de Diagnóstico Técnico de la Facultad de Mecánica de la ESPOCH, esta nueva caja permitió ir variando la posición del sensor y por ende ir tomando las mediciones de la velocidad de vibración radial cada 6°; luego que se tomaron las mediciones en todas las posiciones se procedió mediante un análisis estadístico en Python a comparar la medida de referencia que fue la horizontal con cada una de las medidas siguientes para establecer hasta que ángulo de inclinación la medida es confiable y no varía de gran manera respecto a la medida de referencia, la metodología implementada en esta investigación tuvo un enfoque cuantitativo, se utilizó un diseño experimental, ya que se manipularon las variables descritas; se utilizó un tamaño de muestra de 35 mediciones por cada ángulo de ubicación del sensor. Mediante esta metodología se logró determinar que, si se desea medir la vibración radial en posición horizontal y por el diseño del equipo no se puede colocar el sensor en dicha posición, hay que asegurarse de tomar una medida donde el sensor no sobrepase los 6° de inclinación respecto a la horizontal.

Palabras clave: <ANÁLISIS DE VIBRACIONES>, <VIBRACIÓN RADIAL>, <VARIACIONES ANGULARES>, <ANÁLISIS ESTADÍSTICO>, <CAJA DE RODAMIENTO>, <CONFIANZA DE MEDICIÓN>, <ÁNGULO DE UBICACIÓN>

0746-DBRA-UPT-2024



ABSTRACT

Organizations performing vibration analysis face a challenge when it comes to measuring radial vibration in equipment with designs that do not allow for perfectly horizontal or vertical placement of the sensor, so they are forced to make measurements with certain angular variations. Uncertainty arises as to whether these measurements reflect reality or are inaccurate; therefore, the objective of the present research work was to determine the influence of the sensor tilt angle on the confidence of radial vibration measurement. For this purpose, a new bearing housing was designed, built, and adapted to the accelerated life testing module in the Technical Diagnostic Laboratory of the Mechanics Faculty at ESPOCH. This new box allowed for the variation of the position of the sensor and, therefore, measurements of the radial vibration velocity to be taken every 6° . After the measurements were taken in all positions, a statistical analysis in Python was used to compare the reference measurement, which was the horizontal one, with each of the following measurements to establish up to which angle of inclination the measurement is reliable and does not vary significantly concerning the reference measurement. The methodology implemented in this research used a quantitative approach; an experimental design was used since the described variables were manipulated, and a sample size of 35 measurements was used for each angle of the sensor location. Using this methodology, it was possible to determine that if it is desired to measure the radial vibration in a horizontal position and due to the design of the equipment, it is not possible to place the sensor in that position, it is necessary to make sure to take a measurement where the sensor does not exceed 6° of inclination concerning the horizontal.

Keywords: <VIBRATION ANALYSIS> <RADIAL VIBRATION> <ANGULAR VARIATIONS> <STATISTICAL ANALYSIS> <ROLLING BOX> <MEASUREMENT CONFIDENCE> <LOCATION ANGLE>



Lic. Sandra Leticia Guijarro Paguay

C.I.: 0603366113

INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la ingeniería y la industria, el estudio de las vibraciones mecánicas es esencial para evaluar el rendimiento y la salud de maquinaria, estructuras y sistemas. Dentro de este contexto, la medición de la vibración radial ocupa un lugar destacado, ya que proporciona información crucial sobre el comportamiento de componentes rotativos como motores, turbinas, rotores, etc.

Sin embargo, surge un desafío significativo cuando se enfrenta la necesidad de medir la vibración radial en equipos cuyos diseños no permiten una colocación perfectamente horizontal o vertical del sensor. En tales casos, las organizaciones se ven obligadas a realizar mediciones con variaciones angulares, lo que plantea dudas sobre la confiabilidad y la precisión de los datos obtenidos.

El presente trabajo de investigación se centra en abordar esta problemática específica mediante el estudio de la influencia del ángulo de inclinación del sensor en la confianza de la medición radial de vibraciones. Para ello, se diseñó, construyó y adaptó una nueva caja de rodamiento al módulo de ensayos de vida acelerada en el Laboratorio de Diagnóstico Técnico de la Facultad de Mecánica de la ESPOCH. Esta caja permitió variar la posición del sensor y tomar mediciones de la velocidad de vibración radial cada 6 grados, lo que proporcionó un conjunto de datos exhaustivo para su análisis.

A través de un enfoque metodológico riguroso, que incluye un análisis estadístico detallado en Python, se compararon las mediciones obtenidas en diferentes ángulos de inclinación del sensor con la medida de referencia horizontal. El objetivo fue establecer hasta qué punto la inclinación del sensor afecta la confiabilidad de las mediciones y determinar los límites dentro de los cuales las mediciones son confiables.

Este estudio busca brindar una comprensión más sólida de cómo la inclinación del sensor influye en las mediciones de vibración lo que permitirá a las organizaciones tomar decisiones más informadas en relación con el mantenimiento predictivo y preventivo de sus equipos. En última instancia, se espera que este trabajo contribuya a garantizar un funcionamiento más confiable y eficiente de la maquinaria industrial, reduciendo costos de reparación y tiempos de inactividad no planificados.

CAPÍTULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento del problema

En la actualidad, algunas empresas que implementan programas de mantenimiento basado en la condición y realizan análisis de vibraciones se enfrentan a un desafío. Cuando se trata de medir la vibración radial en equipos con diseños que no permiten una colocación perfectamente horizontal o vertical del sensor, se ven obligadas a realizar mediciones con ciertas variaciones angulares. Esta situación plantea la incertidumbre de si estas mediciones reflejan la realidad o si son inexactas.

1.2 Objetivos

1.2.1 *Objetivo general*

Determinar la influencia del ángulo de inclinación del sensor en la confianza de la medición radial de vibraciones.

1.2.2 *Objetivos específicos*

Determinar los requisitos para el módulo de pruebas donde se van a realizar la medición de vibraciones

Diseñar el modelo de toma de datos de velocidad global de vibración rms.

Obtener datos de vibración radial con diferentes ángulos de inclinación del sensor.

Aplicar un modelo estadístico para el análisis de datos, para verificar la confianza de la medición radial de vibraciones.

Analizar los resultados obtenidos.

1.3 Justificación

Esta investigación es relevante debido a la necesidad de comprender cómo la inclinación del sensor puede afectar la precisión de las mediciones de vibraciones radiales en situaciones donde no es posible colocar el sensor en una posición estándar. El conocimiento generado ayudará a mejorar las prácticas de mantenimiento predictivo y a garantizar un funcionamiento más confiable de la maquinaria industrial, lo que a su vez contribuirá a la reducción de costos de reparación y tiempo de inactividad.

El propósito de este proyecto de investigación es abordar este problema y determinar si la variación del ángulo del sensor tiene un impacto significativo en la precisión de las mediciones.

Con esto se pretende mejorar la toma de mediciones. Esta mejora es esencial desde tres perspectivas clave:

Desde un punto de vista técnico, se busca elevar la credibilidad de los datos recopilados.

Desde un punto de vista económico, se anticipa un ahorro en costos significativo al optimizar las mediciones.

Y desde un punto de vista científico, este proyecto podría contribuir a la generación de nuevo conocimiento en un área que aún no se ha explorado por completo. En conjunto, este estudio busca no solo entender la influencia del ángulo del sensor, sino también mejorar la forma en que se realizan las mediciones y por lo tanto contribuirá a mejorar la eficacia de los programas de mantenimiento predictivo y a garantizar un funcionamiento óptimo de los equipos.

1.4 Hipótesis

Hipótesis nula:

Ho: El ángulo de ubicación del sensor no influye en la confianza de la medición radial de vibraciones

Hipótesis alternativa:

Ha: El ángulo de ubicación del sensor influye en la confianza de la medición radial de vibraciones

Variables:

Variable dependiente:

Confianza de la medición radial de vibraciones

Variable independiente:

Ángulo de ubicación del sensor

Variables intervinientes:

Nivel de módulo

Superficie del montaje

Vibraciones ambientales

Calibración del sensor

Errores humanos

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Confianza de la medición

2.1.1 *Concepto de confianza de medición*

La confianza de la medición se refiere a la evaluación de cuán creíbles y precisas son las mediciones realizadas en un experimento o estudio. Implica la capacidad de confiar en que los resultados obtenidos son una representación fiel de la magnitud o propiedad que se está midiendo. La confianza de la medición abarca la idea de que las mediciones son precisas y reproducibles, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones y la interpretación de resultados en el contexto de un experimento o estudio.

2.1.2 *Precisión y exactitud*

La precisión y exactitud son términos interrelacionados que se refieren a la habilidad de los instrumentos o escalas durante la medición de variables. Para una comprensión más detallada, en la ilustración 2-1, un instrumento arroja resultados con mínima variabilidad, se puede inferir que es más preciso. Por otro lado, la exactitud de un instrumento se determina por su capacidad para obtener resultados considerados como “verdaderos” o “libres de sesgos (Villasís et al., 2018 págs. 216-217).

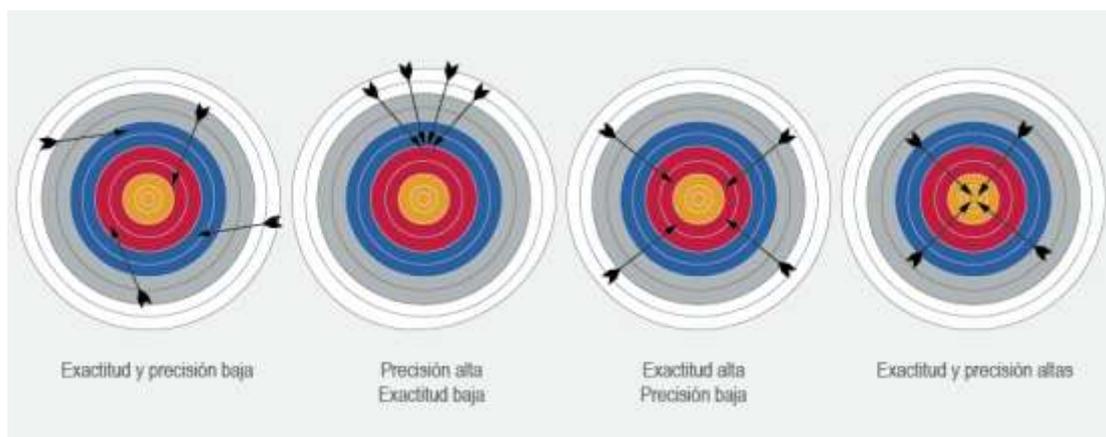


Ilustración 2-1: Precisión y exactitud

Fuente: (Villasís et al., 2018, pág.417)

2.1.3 Reproducibilidad

Se refiere a la variación originada por el sistema de medición, es la variabilidad evidente cuando distintos operadores miden repetidamente la misma entidad utilizando el mismo sistema de medición en condiciones idénticas (Escamilla et al., 2020 pág. 4).

La medición es reproducible si diferentes personas o equipos pueden obtener resultados comparables.

2.1.4 Repetibilidad

Se define como la variación ocasionada por el aparato de medición, es la variabilidad que se percibe cuando un mismo operador mide repetidamente una misma parte utilizando el mismo sistema de medición en condiciones iguales (Escamilla et al., 2020 pág. 4)

2.1.5 Incertidumbre

Es una parte inherente de cualquier medición y representa la falta de conocimiento completo sobre el valor verdadero. La evaluación y cuantificación de la incertidumbre son fundamentales para comprender y comunicar la confiabilidad de las mediciones (Alzate, 2008, pág. 375)

2.2 Métodos de evaluación de la confianza de una medida

A continuación, se describen algunos de los métodos más usados en estadística y en trabajos de investigación que sirven precisamente para evaluar la confianza de una o varias medidas que se han tomado previamente.

2.2.1 Desviación estándar y coeficiente de variación

La desviación estándar de un conjunto de datos, es la medida de la variación de los datos con respecto a la media de los mismos. El coeficiente de variación es la desviación estándar expresada como un porcentaje de la medida, proporcionando una medida relativa de la precisión (Triola, 2009, pág. 94)

2.2.2 Intervalos de confianza

Un intervalo de confianza es un rango de valores utilizado para estimar el valor verdadero de un parámetro de población. (Triola, 2009, pág. 322). Cuanto más estrecho sea el intervalo, mayor será la confianza en la medición.

2.3 Factores que afectan la confianza

A continuación, se explica algunos de los factores más comunes que pueden afectar la confianza en el contexto de las mediciones.

2.3.1 Errores sistemáticos

2.3.1.1 Calibración inadecuada

La falta de una calibración precisa y regular de los instrumentos de medición pueden introducir sesgos sistemáticos, afectando la precisión y exactitud de las mediciones.

2.3.1.2 Error de paralaje

Ocurre cuando la escala no coincide con la magnitud que se mide, en consecuencia, dependiendo de la posición del observador, las graduaciones leídas en la escala varían. Este tipo de error surge al leer una variable utilizando un instrumento analógico (Guerrero y Diaz, 2007, pág. 16).

2.3.1.3 Error de cero

Ocurre cuando un instrumento está mal calibrado y muestra una lectura diferente de cero cuando debería marcar precisamente cero. Este tipo de error se soluciona calibrando el instrumento o sumando o restando el valor que se encuentra descalibrado, según sea el caso (Guerrero y Diaz, 2007, pág. 16)

2.3.2 Factores externos

A continuación, se describe alguno de los principales factores externos que podrían afectar a un estudio en donde se estén midiendo variables de vibración:

2.3.2.1 Interferencia electromagnética

La presencia de interferencia electromagnética de fuentes externas puede afectar los instrumentos de medición electrónicos, generando mediciones inexactas.

2.3.2.2 Vibraciones y ruido

Las vibraciones externas o el ruido ambiental pueden impactar la estabilidad de los equipos de medición y contribuir a mediciones inexactas.

2.4 Generalidades de las vibraciones

2.4.1 Definición de vibración

Una vibración se puede considerar como el movimiento repetitivo u oscilación de un objeto alrededor de una posición de equilibrio (White, 2010, pág. 16)

Según la norma ISO 2041:2009, la oscilación es la variación generalmente con el tiempo de la magnitud de una cantidad con respecto a una referencia específica (ISO 2041, 2009)

2.4.2 Clasificación de las vibraciones

Alguno de los tipos de vibraciones más comunes que existen se detallan a continuación:

2.4.2.1 Vibración libre

Cuando un sistema es perturbado inicialmente y luego se le permite vibrar por sí solo, la vibración resultante se denomina vibración libre

2.4.2.2 Vibración forzada

Cuando un sistema es afectado por una fuerza externa, típicamente repetitiva, la vibración resultante se denomina vibración forzada. Un ejemplo de este fenómeno es la vibración presente en máquinas como los motores a diésel (RAO, 2012, pág. 16)

2.4.2.3 *Vibración amortiguada*

Cuando la energía se disipa debido a la fricción u otras resistencias durante la oscilación, se denomina vibración amortiguada, esto significa que, con el tiempo, la energía del sistema disminuye gradualmente, lo que resulta en una disminución en la amplitud de oscilación.

2.4.2.4 *Vibración no amortiguada*

Cuando la energía debido a la fricción u otras resistencias durante la oscilación, se denomina vibración no amortiguada, esto significa que el sistema conserva su energía vibracional sin disminución durante el tiempo.

2.4.2.5 *Vibración determinística*

Una vibración determinística es aquella en la que podemos predecir con precisión el valor de su magnitud, fuerza o movimiento en un momento específico, esto implica que, con información adecuada sobre las condiciones iniciales y las fuerzas aplicadas, se puede calcular con certeza como evolucionara la vibración en el tiempo (Guzmán y Balvantín, 2018 pág. 3221).

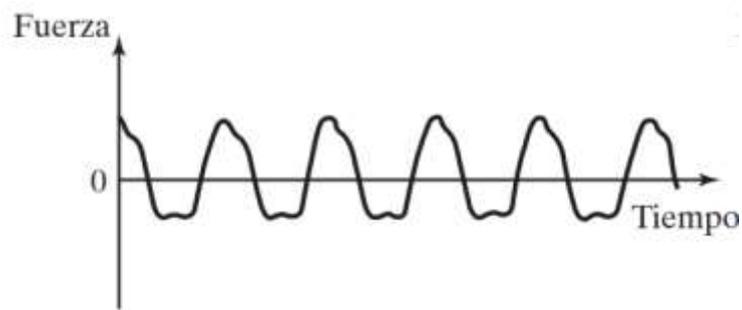


Ilustración 2-2: Vibración determinística

Fuente: (RAO, 2012, pág. 17)

2.4.2.6 *Vibración aleatoria*

La vibración aleatoria se caracteriza por la imprevisibilidad en el valor de excitación en un momento dado, esto significa que no se puede anticipar con certeza cómo será la fuerza o la magnitud del movimiento en un instante específico, en lugar de seguir un patrón predeterminado, la vibración aleatoria exhibe fluctuaciones irregulares y sin un comportamiento predecible (Guzmán y Balvantín, 2018 pág. 3221).

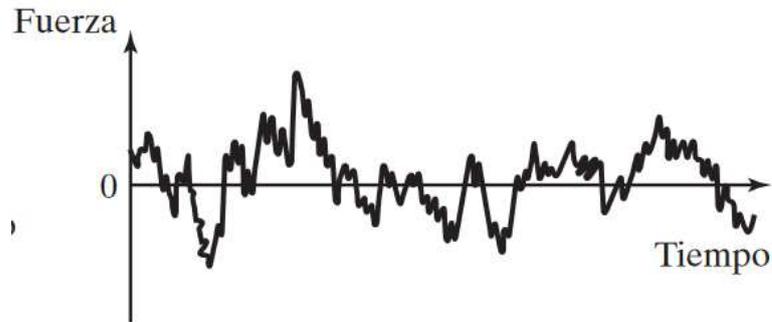


Ilustración 2-3: Vibración determinística

Fuente: (RAO, 2012, pág. 17)

2.4.3 *Medición de vibración*

La ilustración 2-2 indica las características de un esquema de medición de vibración, el mismo que empieza cuando el movimiento del cuerpo vibratorio se transforma en una señal eléctrica por medio de un transductor, que es un dispositivo que transforma los cambios de cantidades mecánicas en cambios de cantidades eléctricas. Como la señal de salida de un transductor es débil, se utiliza un conversor de señales para amplificar dicha señal, luego de ser amplificada esta señal se guarda en una computadora para su posterior análisis (RAO, 2012, pág. 825).

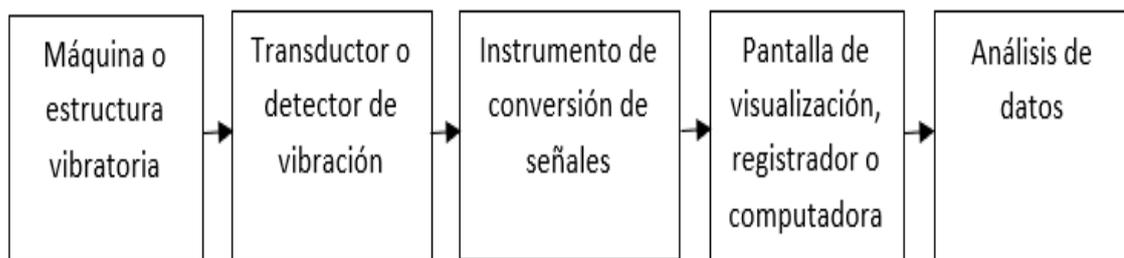


Ilustración 2-4: Esquema de medición de vibración

Fuente: (RAO, 2012, pág. 825).

2.4.4 *Vibración radial*

La vibración radial es un tipo de vibración en la cual un objeto o sistema se mueve o vibra en dirección radial desde un punto central hacia afuera. Esto significa que el movimiento que se produce a lo largo de una línea recta que se extiende desde el centro del objeto hacia el exterior, como los radios de una rueda.

2.4.5 Factores que producen vibración radial

Este tipo de vibración puede ser causado por diferentes factores, como desequilibrios en la distribución de masa, fuerzas centrífugas o excitaciones externas, además puede tener diferentes frecuencias y amplitudes, por lo que su estudio es importante en diversos campos.

2.5 Transductores de medición de vibración

2.5.1 Acelerómetro

Un acelerómetro es un dispositivo que mide la fuerza generada por el cambio de movimiento de un cuerpo, es decir la aceleración, esta se refiere a los cambios de velocidad de un objeto en una dirección específica respecto al tiempo (Rosero et al., 2022 pág. 64).

2.5.2 Tipos de Acelerómetros

2.5.2.1 Acelerómetros piezoeléctricos

Se podría considerar al acelerómetro piezoeléctrico como el transductor estándar para la medición de vibración en maquinaria, consiste en una masa sísmica que está sujeta a la base con un perno axial, que se apoya en un resorte circular el elemento piezoeléctrico está ajustado entre la base y la masa cuando el acelerómetro experimenta vibración, se genera una fuerza que actúa sobre el elemento piezoeléctrico, siendo esta fuerza igual al producto de la aceleración por la masa sísmica produciéndose una salida de carga proporcional a la fuerza aplicada (White, 2010, pág. 55).

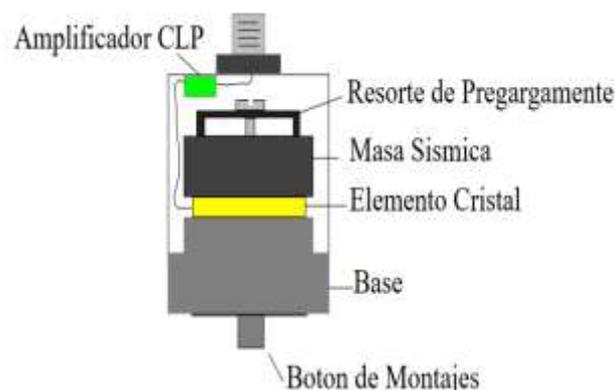


Ilustración 2-5: Acelerómetro piezoeléctrico

Fuente: (White, 2010, pág. 55).

2.5.2.2 Acelerómetros piezoresistivos

Los acelerómetros piezoresistivos operan en base al principio en donde una masa, al ser expuesta a una aceleración, experimenta una fuerza inercial que provoca una deformación en los componentes del soporte, introduciendo un estrés y una tensión cuya magnitud permite inferir la aceleración aplicada (Sosa, 2013, pág. 16).

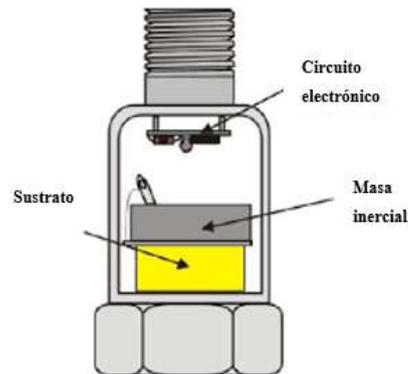


Ilustración 2-6: Acelerómetro piezoresistivo

Fuente:(Universidad de Sevilla, 2017, pág.43)

2.5.2.3 Acelerómetros capacitivos

En un acelerómetro capacitivo, el elemento que conecta la masa inercial con la carcasa es un condensador. Cuando ocurre una aceleración la masa sísmica cambia la separación entre las cajas de un condensador, lo que ocasiona una alteración en la capacidad del mismo, este cambio se detecta y se utiliza para calcular la vibración de la masa y por ende del sistema bajo análisis (Lentijo, 2018, pág. 3).

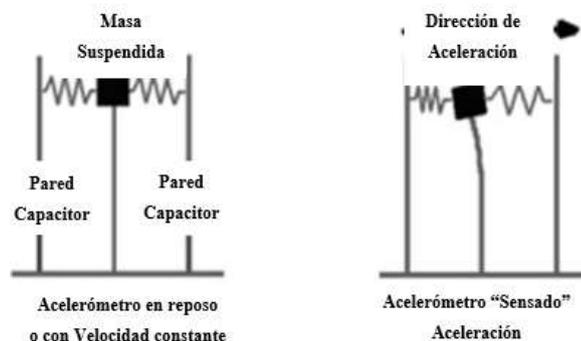


Ilustración 2-7: Acelerómetro capacitivo

Fuente: (Universidad de Sevilla, 2017, pág.44)

2.5.3 *Funcionamiento del acelerómetro*

Los acelerómetros son dispositivos diseñados para la medición de aceleración y vibración, funcionan transformando la aceleración, ya sea gravitacional o de movimiento, en una señal eléctrica analógica que es proporcional a la fuerza ejercida sobre el sistema o el mecanismo sujeto a vibración o aceleración. Esta señal eléctrica proporciona una representación en el tiempo real de la aceleración instantánea del objeto sobre el cual se encuentra instalado el acelerómetro (Manzanares del Moral, 2008, pág. 8).

El acelerómetro puede detectar tanto la aceleración positiva (aumento de velocidad) como la aceleración negativa (disminución de velocidad).

2.6 **Magnitudes en el análisis de vibraciones**

2.6.1 *Movimiento Armónico Simple*

Para comprender todas las magnitudes físicas que intervienen en el análisis de vibraciones se debe partir de lo que se conoce como Movimiento Armónico Simple que se refiere al movimiento básico de una masa conectada a un resorte, donde la masa se desplaza en una dirección y el resorte la devuelve al punto de equilibrio cuando se libera. Durante este proceso, la energía se transfiere entre la masa y el resorte, cambiando entre energía cinética y energía potencial elástica (White, 2010, págs. 16-17).

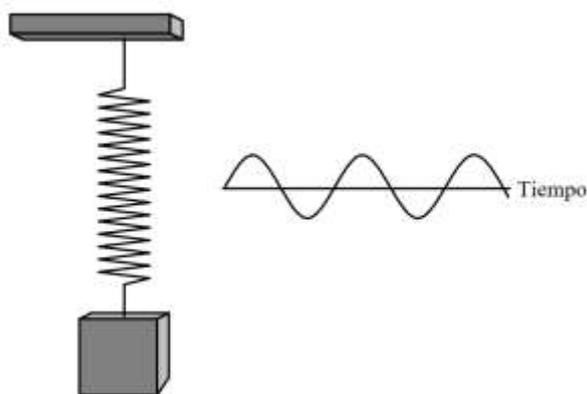


Ilustración 2-8: Movimiento armónico simple

Fuente: (White, 2010, pág. 17)

2.6.2 Periodo

Es el tiempo necesario para que un objeto complete un ciclo completo de vibración, es decir, regrese a su posición inicial después de haberse movido en una dirección y luego en la dirección opuesta. El periodo se mide en segundos o milisegundos dependiendo de qué tan rápido se cambie la onda (White, 2010, pág. 17).

2.6.3 Frecuencia

Es el número de oscilaciones o ciclos completos que realiza un objeto en un intervalo de tiempo específico generalmente un segundo. Se expresa en Hertz, donde 1Hz es equivalente a un ciclo por segundo

2.6.4 Desplazamiento

Si se graficara la posición o el desplazamiento de un objeto experimentando un movimiento armónico simple, la curva resultante tomaría la forma de una onda sinusoidal como se muestra en la ilustración tal y se lo puede expresar con la siguiente ecuación

Ecuación 1-2: Desplazamiento

$$d = D \cdot \sin(\omega t)$$

Donde:

d = desplazamiento instantáneo

D = desplazamiento máximo o pico

t = tiempo

Por lo que el desplazamiento representaría la distancia y dirección desde la posición de equilibrio hasta la posición actual de un objeto en vibración en un momento dado.

2.6.5 Velocidad

Se refiere a la tasa de cambio del desplazamiento respecto al tiempo, indica que tan rápido se está moviendo el objeto vibrante en un instante específico.

Este cambio relativo entre dos cantidades se puede expresar derivando la ecuación del desplazamiento indicada anteriormente:

Ecuación 2-2: Velocidad

$$v = \frac{dd}{dt} = \omega * D * \cos(\omega t)$$

Donde:

v = velocidad instantánea

D = desplazamiento máximo o pico

t = tiempo

2.6.6 Aceleración

Se refiere a la tasa de cambio de la velocidad de un objeto, es decir que tan rápido la velocidad está cambiando en cualquier instante, y se la puede representar derivando la ecuación de la velocidad mostrada anteriormente:

Ecuación 3-2: Aceleración

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2d}{dt^2} = -\omega^2 * D * \sin(\omega t)$$

Donde:

a = aceleración instantánea

D = desplazamiento máximo o pico

t = tiempo

2.6.7 Amplitud

Se refiere a la magnitud máxima de la oscilación de un objeto desde su punto de equilibrio. Se mide en unidades de longitud como metros (m) en el sistema internacional.

2.7 Severidad de vibraciones

2.7.1 Norma ISO 10816-1

La norma ISO 10816-1 establece criterios para la evaluación de vibraciones en función de la velocidad efectiva de la vibración medida en mm/s, esta norma define niveles de vibración aceptables para diferente tipo de maquinaria y condiciones de funcionamiento.

La norma ISO 10816-1 se basa en cinco partes que se detallan a continuación:

Parte 1: Indicaciones generales

Parte 2: Turbinas de vapor y generadores mayores a los 50MW con velocidades de 1500, 1800, 300 y 3600 RPM

Parte 3: Maquinaria con potencia mayor a 15kW y velocidades entre 120 y 1500 RPM

Parte 4: Sistemas con transmisión por turbinas de gas

Parte 5: Sistemas en plantas de hidrogenación y bombeo

La severidad de vibraciones se clasifica de acuerdo a los siguientes parámetros:

- Tipo de máquina
- Potencia o altura del eje
- Flexibilidad del soporte

Clasificación de acuerdo al tipo de máquina, potencia o altura de eje:

Debido a los diferentes tipos de diseño de las máquinas, es necesario dividir en grupos los cuales se muestran a continuación:

- **Grupo 1:** Máquinas rotatorias grandes, con potencia que excede los 300 kW. Maquinas eléctricas con altura de eje $H \geq 315$ mm.
- **Grupo 2:** Máquinas rotatorias medianas, potencia entre 15 y 300 kW. Maquinas eléctricas con altura de eje $160 \leq H \leq 315$ mm.
- **Grupo 3:** Bombas con motor separado, potencia > 15 kW.
- **Grupo 4:** Bombas con motor integrado, potencia > 15 kW.

Clasificación según la flexibilidad del soporte:

- **Zona A:** Valores de vibración de máquinas recién instaladas o reacondicionadas.
- **Zona B:** Maquinas capaces de operar de manera continua sin limitaciones.
- **Zona C:** La máquina no está en condiciones óptimas para un funcionamiento continuo, sino que solo puede operar durante un tiempo limitado. Se deben realizar correcciones durante la próxima parada programada.
- **Zona D:** Los niveles de vibración presentan un riesgo, ya que pueden ocasionar daños en la máquina.

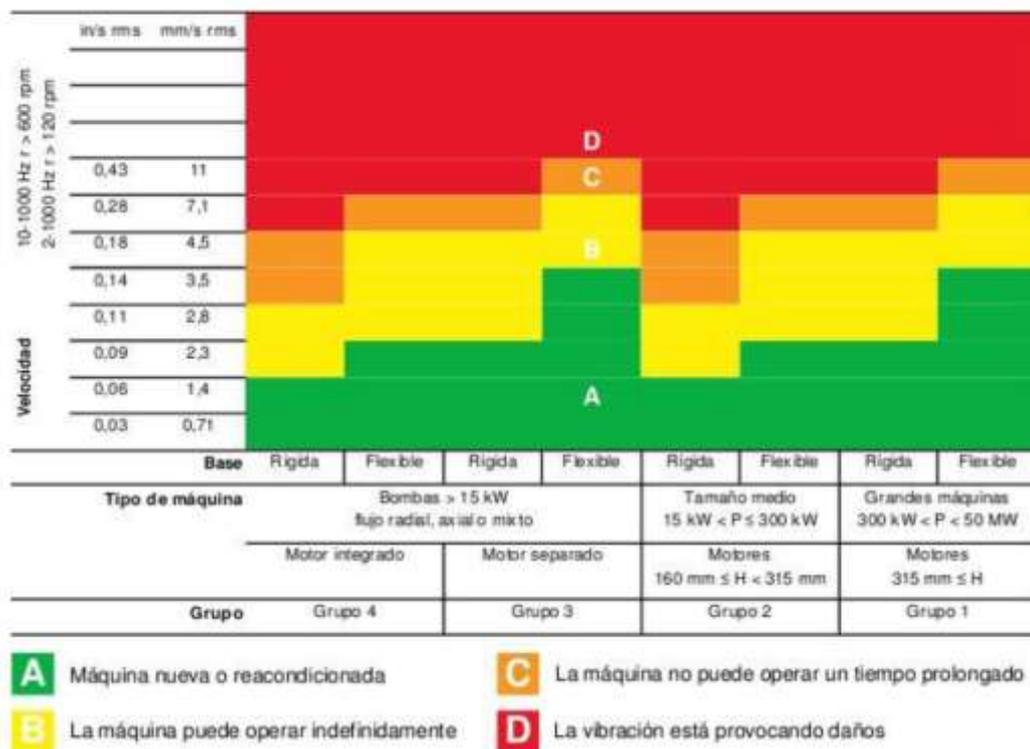


Ilustración 2-9: Valores de severidad de vibración

Fuente: <https://rodesprex.com/assets/img/services/servbenf04.pdf>

2.8 Orientación del punto de medición

De acuerdo a la norma ISO 1373-1 las ubicaciones de los transductores para fines de monitoreo de la condición dependen de la maquina en particular y de los parámetros específicos que se van a medir, antes de especificar la “ubicación” primero es necesario identificar que parámetros deben monitorearse (ISO 13373-1, 2002, pág. 8)

Dichos parámetros que deben monitorearse son los siguientes:

- La vibración absoluta de la carcasa de la máquina
- El movimiento vibratorio del rotor con respecto a la carcasa
- La posición del eje con respecto a la carcasa durante el funcionamiento de la maquina
- El movimiento absoluto del eje

Las ubicaciones típicas para mediciones de vibración en máquinas horizontales son en cada soporte de cojinete o pedestal, se toman dos direcciones radiales al eje de la máquina y una dirección axial en cada punto de medición, como se muestra en la siguiente ilustración:

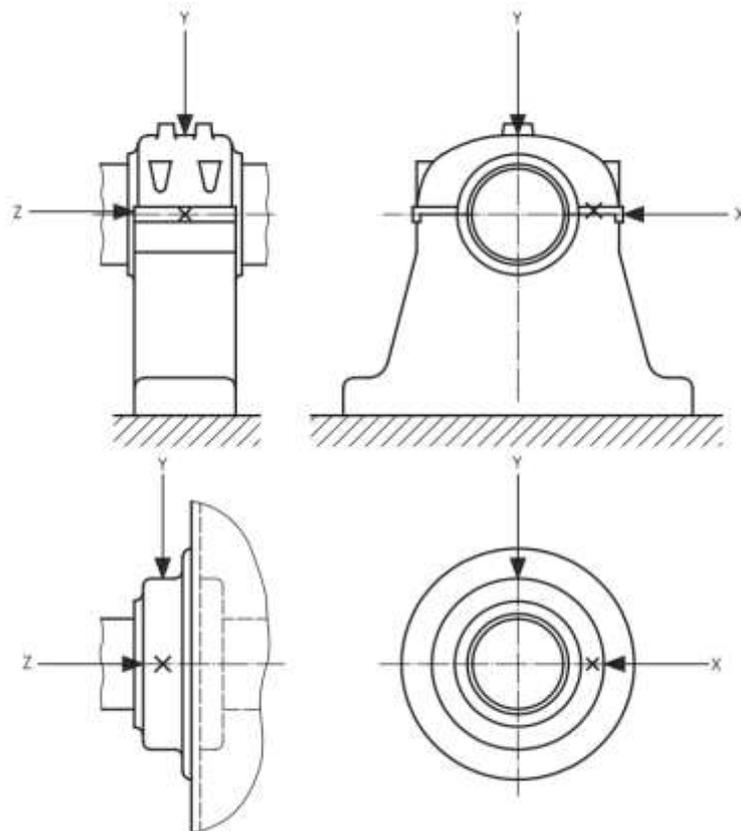


Ilustración 2-10: Orientaciones del punto de medición

Fuente: Norma ISO 1373-1

Donde:

X: Vibración radial horizontal

Y: Vibración radial vertical

Z: Vibración axial

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1 Módulo de ensayos de vida acelerada

El módulo en donde se realizarán las mediciones es el de ensayos de vida acelerada, que se encuentra en el Laboratorio de Diagnóstico Técnico de la Facultad de Mecánica de la ESPOCH, este módulo se encuentra constituido por un motor WEG-W22 de 5 hp que transmite la potencia generada a través de un eje articulado al motor mediante un acople tipo mandíbula, este eje se apoya en dos chumaceras tipo UCP-208, que lo conducen hasta una caja de rodamiento que en su interior lleva un rodamiento NTN 6008Z, a su vez esta caja se encuentra acoplada en la parte superior al pistón de una bomba hidráulica, la misma que se encuentra anclada a una caja superior e inferior por medio de cuatro soportes.

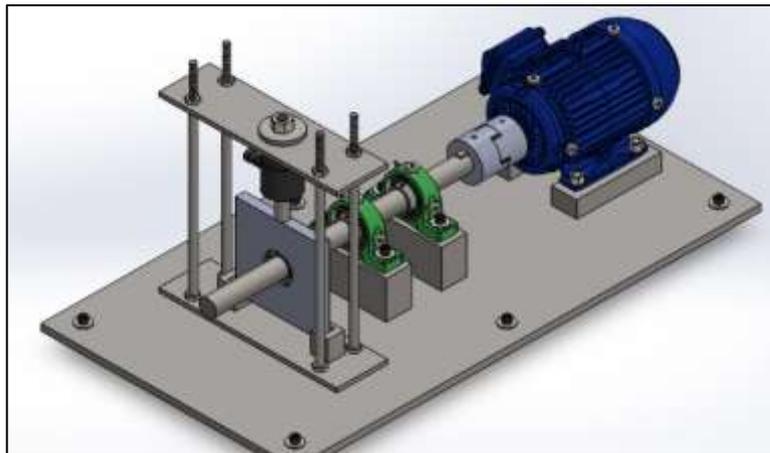


Ilustración 3-1: Módulo de ensayos de vida acelerada

Realizado por: Orozco W., 2024.

3.2 Requisitos del módulo

El módulo actual de ensayos de vida acelerada debido a su forma cuadrada sólo permite realizar mediciones de vibración radial en las posiciones horizontal y vertical ya que son en dichas posiciones en donde se encuentran los dos insertos que se utilizan para colocar el sensor por lo que para la correcta realización de esta investigación se necesitará diseñar, construir y adaptar al módulo una nueva caja de rodamiento que permita colocar el sensor en distintas posiciones.

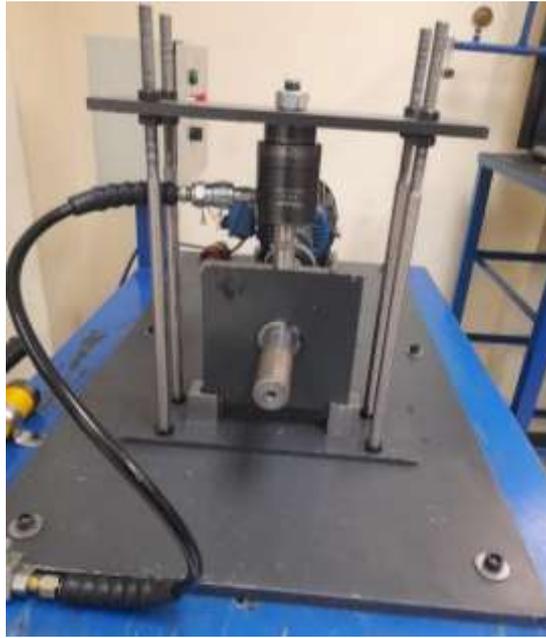


Ilustración 3-2: Caja actual del módulo

Realizado por: Orozco W., 2024.

3.3 Diseño de la caja de rodamiento nueva

Para el diseño de la caja de rodamiento se utilizará el software SolidWorks que es uno de los más conocidos y utilizados para el diseño mecánico donde se incluirán especificaciones sobre la forma, los ángulos permitidos y cualquier característica adicional necesaria para facilitar la colocación y fijación segura del sensor.

Este proceso de diseño proporcionará las bases necesarias para implementar un módulo de pruebas versátil y ajustable, permitiendo así la variación controlada del ángulo de ubicación del sensor durante las mediciones de vibración radial.

3.3.1 Selección de la forma de la caja

Para lograr la variación deseada en la ubicación del sensor, se propone el diseño de una caja basada en el diseño original de la caja actual, pero modificando la esquina superior derecha, para darle una apariencia hexagonal, esto con el objetivo de obtener superficies planas que faciliten la colocación del sensor en diferentes ubicaciones, esta variación permitirá tomar las mediciones de vibración radial en distintas posiciones, lo que a su vez permitirá determinar como la posición del sensor influye en estas mediciones.

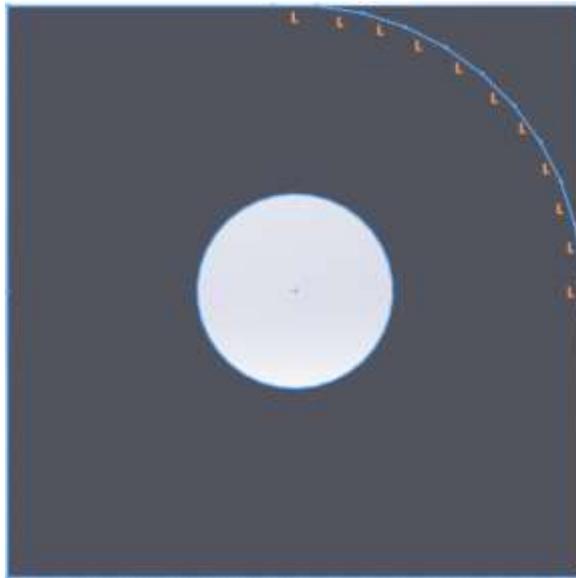


Ilustración 3-3: Diseño de la caja actual del módulo

Realizado por: Orozco W., 2024.

3.3.2 *Materiales y dimensiones*

El material en el cual se va a construir la caja para esta investigación será el mismo del que está construida la caja actual (ASTM A36) por su resistencia y durabilidad es un material que garantizará que la caja perdure en el tiempo.

Tabla 3-1: Propiedades mecánicas del acero ASTM A-36

Esfuerzo a la fluencia mínima	Esfuerzo a la tensión	Elongación mínima en 50 mm (2")	Módulo de elasticidad
250 MPa	400-550 MPa	23%	200 GPa
36300 PSI	58000-79800 PSI		29000 KSI

Realizado por: Orozco W., 2024.

En cuanto a las dimensiones de la nueva caja serán similares a las de la caja existente, esto debido a que la caja nueva deberá acoplarse al módulo existente por ende a sus medidas, lo que variará será únicamente su forma cuadrada en la esquina superior derecha de acuerdo a las necesidades del estudio.

Para visualizar las medidas finales de la caja nueva, consulte el Anexo A, donde encontrará el plano detallado de la caja.

3.3.3 *Determinación del número de superficies planas de la caja*

3.3.3.1 *Dimensiones del acelerómetro*

Para determinar el número óptimo de lados planos que tendrá la nueva caja de rodamiento, es crucial considerar las dimensiones de la base del sensor que se colocara en cada uno de estos lados, el diseño de los lados planos con longitudes excesivamente grandes resultaría en un desperdicio de espacio, mientras que longitudes muy pequeñas impedirían un acoplamiento efectivo del sensor, por lo tanto es necesario establecer una longitud mínima para los lados planos de la caja, aunque un mayor número de lados planos aumentaría la precisión del estudio, se debe encontrar un equilibrio para evitar que el diseño de la caja obstaculice el acoplamiento del sensor.



Ilustración 3-4: Acelerómetro

Realizado por: Orozco W., 2024.

Como se puede observar en la ilustración el sensor tiene en su base una rosca, la cual permite ajustar el sensor a la superficie en donde se va a tomar la medición por medio de un tornillo, por lo tanto, es necesario medir la rosca para colocar un tornillo prisionero en cada uno de los lados planos de la caja, cada lado debe garantizar suficiente espacio para que el tornillo prisionero encaje correctamente, facilitando así la colocación adecuada del sensor.

Después de medir la base del sensor, en particular la rosca, se determinó que tiene una medida de 5 mm, por lo tanto, es necesario que cada lado de la caja permita el montaje de un tornillo prisionero con esa medida para asegurar un acople adecuado del sensor en cada lado plano de la caja.

Una vez establecida la longitud mínima requerida para cada lado plano de la caja, se procede a determinar el ángulo de separación entre cada uno de ellos, para esto se realizó un diseño con distintos ángulos de separación específicamente con ángulos de 15°,10°,9° y 6°, dando como resultado distintas longitudes por cada ángulo como a continuación se muestra

Tabla 3-2: Detalle de la medida de cada lado

Ángulo de separación	Número de lados planos obtenidos	Longitud de lado plano(mm)	Longitud mínima necesaria (mm)
15°	6	26.11	10.00
10°	9	17.46	10.00
9°	10	15.72	10.00
6°	15	10.47	10.00

Realizado por: Orozco W., 2024.

Luego de comparar cada ángulo de separación se concluyó que la mejor opción es la de 6° ya que con esa separación se obtendrán lados planos con longitudes mayor a la mínima necesaria lo que garantizará que el sensor se acople de buena manera y además se obtendrán un número total de 15 lados planos, por lo que se harían 15 mediciones en distintas posiciones.

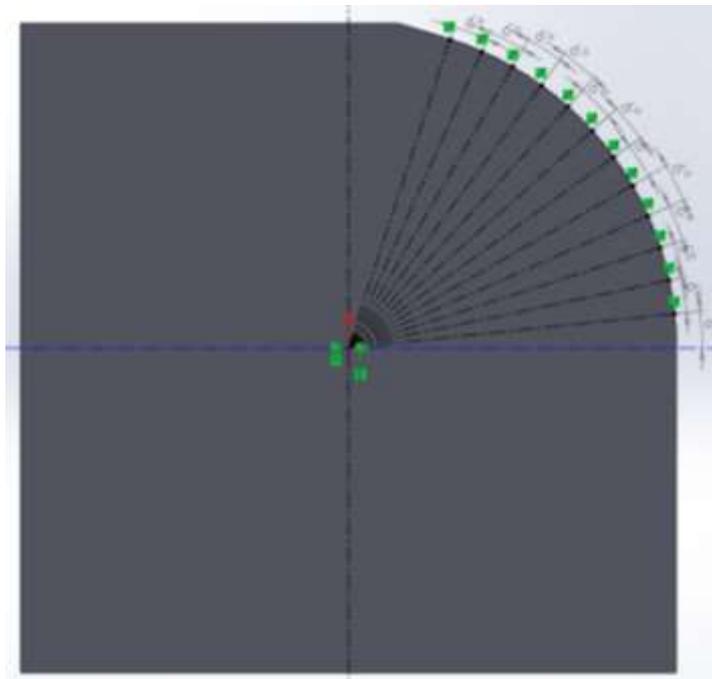


Ilustración 3-5: División de caja

Realizado por: Orozco W., 2024.

3.3.4 *Determinación del número de insertos en la caja*

Si bien se podrían realizar 15 mediciones, considerando los 15 lados planos disponibles para colocar el sensor, es necesario tener en cuenta el diseño del módulo de ensayos de vida acelerada que es en donde se efectuarán las mediciones, este módulo presenta un vástago de pistón en su lado superior, utilizado para aplicar carga a la caja mediante una bomba hidráulica, esta configuración impide realizar en la nueva caja la toma de medida vertical y de las dos mediciones siguientes a esta, ya que el acelerómetro chocaría con el vástago del pistón, obstaculizando su correcto posicionamiento en la caja. Por lo tanto, el número total de mediciones se reduce a 12, sabiendo esto se procede a perforar y roscar los agujeros en cada lado de la caja para insertar los tornillos prisioneros, esto permitirá que el acelerómetro se una al tornillo prisionero correspondiente en cada lado de la caja mediante su rosca, asegurando así la correcta toma de medidas (Ilustración 3-6).

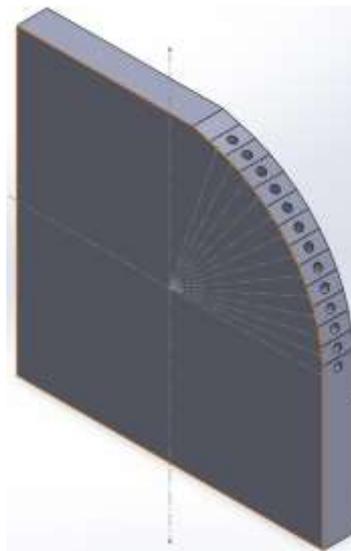


Ilustración 3-6: Insertos en la caja

Realizado por: Orozco W., 2024.

Una vez que se han realizado los 12 agujeros con su respectiva rosca en cada lado plano de la caja se procede a realizar el agujero o compartimento en donde se instalará el rodamiento dentro de la caja, para esto se toma la medida del diámetro exterior del rodamiento y se procede a realizar el agujero correspondiente.

Finalmente se realiza el agujero con su respectiva rosca, en donde se acoplará el vástago del pistón de la bomba hidráulica con la caja de rodamiento en la posición vertical superior.

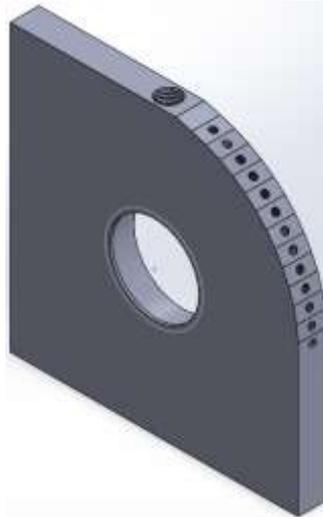


Ilustración 3-7: Compartimento del rodamiento

Realizado por: Orozco W., 2024.

3.3.5 *Simetría de la caja*

Una vez que se ha determinado el número de insertos que se van a realizar para tomar las mediciones se ha identificado la importancia de mantener cierta simetría en la caja, esto debido a que, si se varía solo un lado de la caja y no el otro podría afectar la medición de vibraciones lo que conllevaría a que las mediciones no sean tan precisas afectando el estudio, para evitar este problema es necesario que la caja tenga una simetría razonable por lo que se ha considerado realizar un chaflan en el lado opuesto de en donde se van a realizar las mediciones por lo que la forma definitiva de la caja (Anexo C) será la que se presenta en la siguiente ilustración:

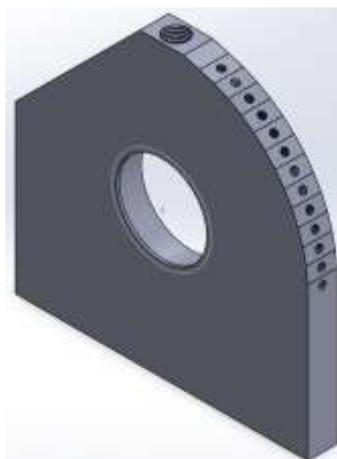


Ilustración 3-8: Diseño final de la caja

Realizado por: Orozco W., 2024.

3.3.6 *Simulación de la caja*

Para poder tener un mayor grado de confiabilidad de que la caja se ajustará a las necesidades del estudio se determinó que una buena opción sería imprimir el modelo de la caja en una impresora 3D antes de construir la caja definitiva que se acoplará al módulo para este propósito se utilizará la impresora 3D que se encuentra disponible en el mismo laboratorio.

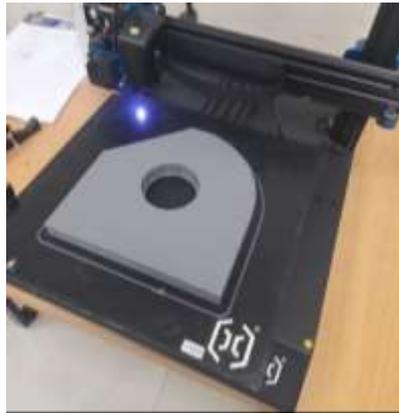


Ilustración 3-9: Impresión 3D

Realizado por: Orozco W., 2024.

3.4 **Construcción de la caja**

Una vez completadas la pruebas en la caja impresa en 3D y verificando el adecuado acoplamiento del sensor en cada lado destinado a la medición, se procede con la fabricación la caja definitiva, esta será manufacturada en el mismo material que la caja actual, el (ASTM A36), utilizando el método de mecanizado con la asistencia del torno y la fresadora.



Ilustración 3-10: Construcción de la caja

Realizado por: Orozco W., 2024.

3.5 Montaje de la caja construida al módulo de ensayos de vida acelerada

Una vez construida la caja, se procede a su montaje en el módulo de ensayos de vida acelerada. Las primeras pruebas de funcionamiento se realizan para verificar que el módulo funcione correctamente como lo hacía antes de cambiar la caja, es decir para los ensayos de vida acelerada, también se verifica que el acelerómetro se acople correctamente a cada uno de los lados de la caja y que este no tope con alguna parte del módulo.

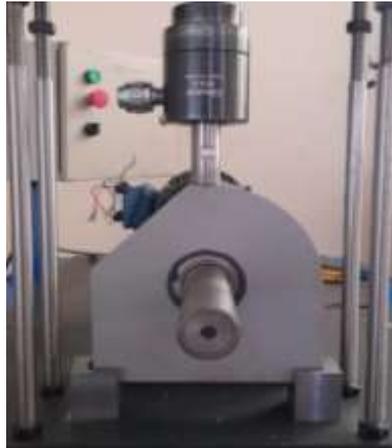


Ilustración 3-11: Montaje de la caja

Realizado por: Orozco W., 2024.

3.6 Alineación del eje del módulo

Una vez que se montó la caja nueva en el módulo se identificó que el eje del módulo se encontraba desalineado por lo que se procedió a la alineación del mismo con la ayuda del alineador láser disponible en el laboratorio de Diagnóstico Técnico de la marca VIBRO-LASER



Ilustración 3-12: Equipo de alineación láser

Realizado por: Orozco W., 2024.

3.6.1 Montaje del VIBRO-LASER

Para el montaje del equipo de alineación en el módulo, se procedió a colocar las unidades de medida láser en cada una de las posiciones, la unidad móvil (M) se colocó a la salida del motor justo antes del acople y la unidad estática (S) se la colocó en el eje posterior al acople, se configuró la altura de cada una de las unidades de medición asegurándose de que la parte superior de la caja de medición (M) se encuentre dos centímetros por debajo de la parte superior de la caja de medición (S), de modo que la línea láser esté en la ventana aplicable de cada una de las cajas de medición, después de que las cajas de medición se encontraron en la posición correcta se procedió a ajustar las cadenas al módulo para que estas queden fijas y se pueda seguir con el procedimiento de alineación.



Ilustración 3-13: Montaje del vibro láser

Realizado por: Orozco W., 2024.

3.6.2 Configuración del software VIBRO-LASER

Una vez que los equipos de alineación láser se encuentran montados en el módulo de manera correcta se procede con la configuración de todos los parámetros necesarios que solicita el software para ello se siguen los siguientes pasos:

Paso 1:

Ingresa al menú del software y seleccionar el tipo de alineación que se va a realizar; en este caso se trata de una alineación horizontal, por lo que se selecciona el icono correspondiente:



Ilustración 3-14: Menú principal del software vibro laser

Realizado por: Orozco W., 2024.

Paso 2:

Se configura el número de rpm que pide el software, este número se obtiene en la caja del motor, en este caso se trata de un motor de 3180 rpm por lo que se selecciona el rango correspondiente en el software.



Ilustración 3-15: Selección del rango de rpm

Realizado por: Orozco W., 2024.

Paso 3:

Ingresar las medidas que solicita el software, para esto se procede a medir con un flexómetro cada una de las medidas necesarias que son las siguientes:

- **Primera medida:** La distancia entre la unidad de medida móvil (M) y la unidad de medida estática (S), que en este caso fue de 145 mm
- **Segunda medida:** La distancia entre el acople y la unidad de medida móvil (M), que en este caso fue de 70 mm

- **Tercera medida:** La distancia entre el acople y la primera pata del motor, que en este caso fue de 135 mm
- **Cuarta medida:** La distancia entre las dos patas del motor, que en este caso fue de 130 mm

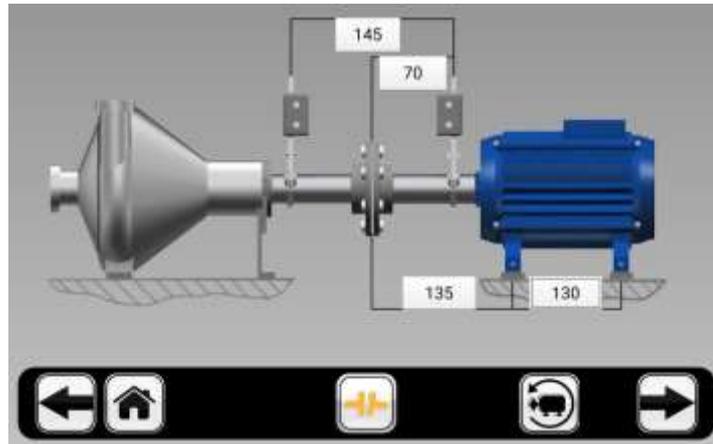


Ilustración 3-16: Configuración de longitudes en el vibro laser

Realizado por: Orozco W., 2024.

Paso 4:

Una vez que se encuentran configuradas las longitudes solicitadas por el software se procede con la medición, para esto se usa el método 3-9-12 que consiste en mover los sensores simulando las posiciones del reloj a la hora 3,9, y 12

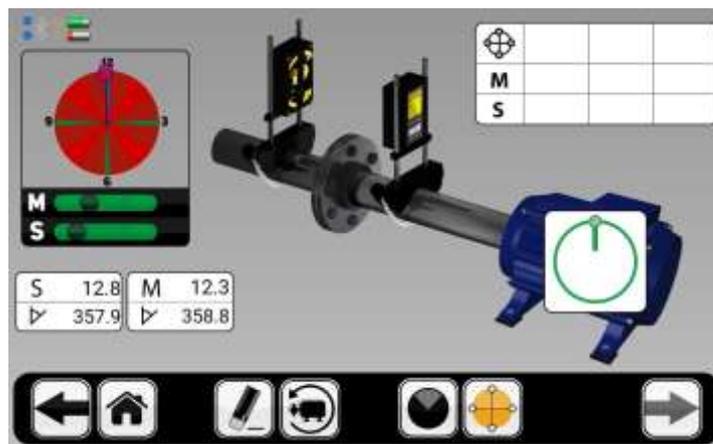


Ilustración 3-17: Movimiento de los sensores del vibro laser

Realizado por: Orozco W., 2024.

Paso 5:

Terminado las mediciones en las distintas posiciones requeridas anteriormente, el software generará un reporte del estado actual de alineación del eje, es decir que indicará que tan alineado o desalineado se encuentra el eje y en qué proporción.

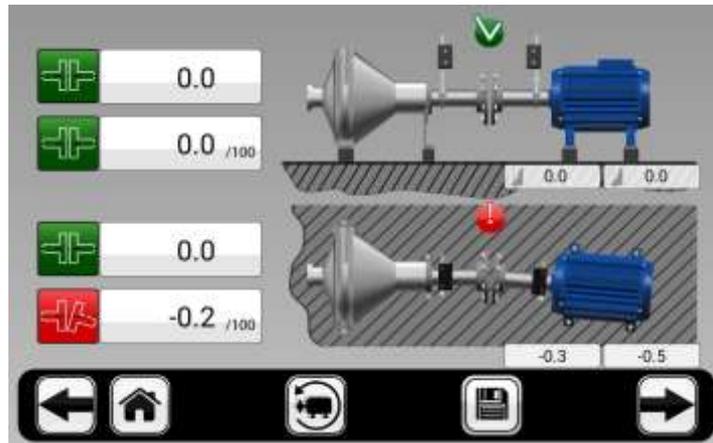


Ilustración 3-18: Reporte de desalineación

Realizado por: Orozco W., 2024.

Paso 6:

El software posee un asistente de alineación en vivo el cual permite ir midiendo la alineación o desalineación en tiempo real mientras se va alineando el eje, por lo que se procede a desajustar el lado móvil que en este caso es el motor para ir subiendo o bajando según la necesidad.

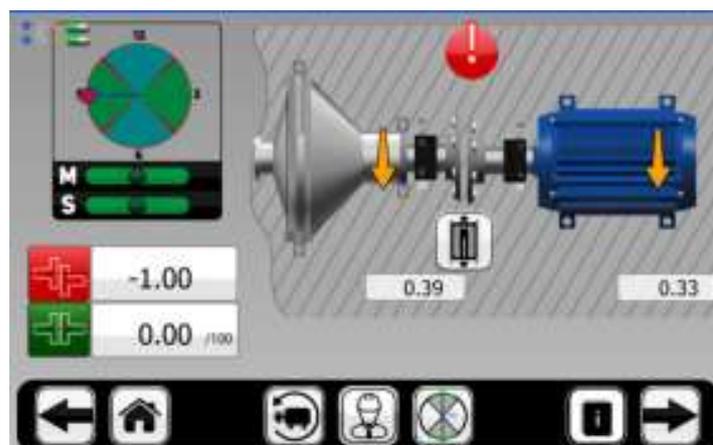


Ilustración 3-19: Asistente de alineación

Realizado por: Orozco W., 2024.

Paso 7:

En este caso se tuvo la necesidad de elevar el motor en la parte de atrás 0.1 mm, para este propósito se utilizaron elevadores de esa medida

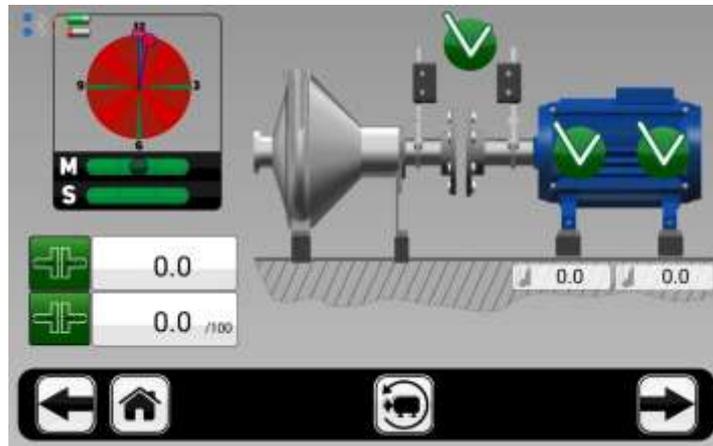


Ilustración 3-20: Reporte de alineación

Realizado por: Orozco W., 2024.

3.7 Diseño y tipo de investigación

El diseño aplicado para la presente investigación es un diseño experimental el cual consiste en realizar un análisis estadístico para validar o refutar una hipótesis. A diferencia de otros diseños, este tipo de estudio permite establecer una relación de causa y efecto dentro de uno o varios grupos

En este tipo de diseño experimental existen tres pilares fundamentales que deben ser considerados los cuales son:

Grupos:

Se establecen dos grupos uno de control y otro experimental, el grupo de control no recibe ningún tipo de intervención, mientras que el grupo experimental si, esta distinción permite observar los efectos específicos de la variable manipulada.

Para esta investigación el grupo de control representa las mediciones de vibración radial horizontal realizadas a 0° , mientras que el grupo experimental representan las mediciones de vibración radial realizadas a los distintos ángulos de inclinación del sensor.

Variable:

El investigador tiene la capacidad de manipular una variable, lo que significa que puede controlar y modificar su valor para observar su impacto en el grupo experimental.

Para esta investigación la variable que se va a manipular es la independiente es decir el ángulo de inclinación del sensor

Distribución: Aleatoria**Procedimiento:**

Cálculo del tamaño de la muestra obteniendo n # de mediciones y aplicando la fórmula para poblaciones infinitas

Toma de datos pertenecientes al grupo de control es decir las mediciones de vibración radial horizontal a 0°.

Toma de datos pertenecientes al grupo experimental es decir las mediciones de vibración radial variando el ángulo de inclinación del sensor.

Aplicación de un método estadístico para comparar la variación entre el grupo de control y el grupo experimental.

3.8 Descripción del enfoque

La presente investigación se lleva a cabo mediante un enfoque cuantitativo, con el propósito de realizar mediciones precisas y numéricas de la vibración radial en distintas posiciones del sensor, estas mediciones se utilizarán para probar o rechazar la hipótesis planteada, se emplearán técnicas estadísticas con el fin de identificar posibles patrones o relaciones significativas entre las variables medidas.

Además, se implementarán medidas para controlar variables externas y minimizar sesgos, como la estandarización de las condiciones de prueba y el uso de múltiples repeticiones de las mediciones.

3.9 Alcance

El alcance de esta investigación es dual por un lado, tiene un alcance exploratorio, ya que aborda un tema poco estudiado y busca proporcionar una comprensión inicial de la variabilidad en la confianza de la medición de la vibración radial con diferentes ángulos de inclinación del sensor, por otro lado, adopta un alcance explicativo, ya que pretende establecer una relación causa efecto entre sus variables, es decir como incide la variable independiente (ángulo de inclinación del sensor) sobre la variable dependiente (confianza de la medición radial de vibraciones).

3.10 Métodos

En esta investigación se emplearán métodos estadísticos para analizar los datos obtenidos de medición de vibración radial:

Uno de estos métodos es el de tratamiento de datos atípicos para reemplazar los valores atípicos en un grupo con la mediana de ese grupo, además se utilizará la prueba de normalidad para determinar si los datos obtenidos se ajustan a una distribución normal utilizando la función de shapiro, también se aplicará la comparación de muestras para evaluar las diferencias entre dos grupos de datos y determinar la variación de la mediana entre ellos, entre otros métodos.

3.11 Técnicas e instrumentos de investigación utilizadas

3.11.1 Técnicas de investigación

Las principales técnicas que se utilizaran en esta investigación serán para controlar las variables intervinientes o externas que podrían aparecer durante el estudio y afectar la calidad del mismo.

Una de las técnicas a utilizar será la estandarización de las condiciones de prueba que implica mantener condiciones consistentes durante la toma de todas las mediciones de vibración radial como la temperatura, la velocidad de operación, la calibración de los instrumentos, entre otras.

Otra técnica que se utilizará es la de toma de mediciones en cada posición de manera repetitiva, esto significa que, una vez que se complete una medición, se procede de inmediato a tomar la otra sin interrupción.

3.11.2 Equipos e instrumentos de investigación

Vibracheck ABG 200

Es un analizador de vibraciones mecánicas de dos canales, colector de datos y balanceador, ideal para controlar la fiabilidad de las máquinas.



Ilustración 3-21: VIBRACHECK 200 ABG

Fuente: Catálogo Idear

Acelerómetro piezo eléctrico 780C

Es un acelerómetro de un solo eje que utiliza un sensor piezoeléctrico para medir la aceleración, el sensor piezoeléctrico genera una carga eléctrica que es proporcional a la aceleración aplicada.



Ilustración 3-22: Acelerómetro piezoeléctrico

Fuente: <https://wilcoxon.com/780c-2/>

MAINTraq Predictive

Es una herramienta de mantenimiento predictivo que permite a las organizaciones recopilar, analizar, y visualizar datos de vibraciones de máquinas y equipos.

Estos datos pueden utilizarse para detectar fallas potenciales antes de que se produzcan, lo que puede ayudar a reducir los costos de mantenimiento y mejorar la confiabilidad de las operaciones.

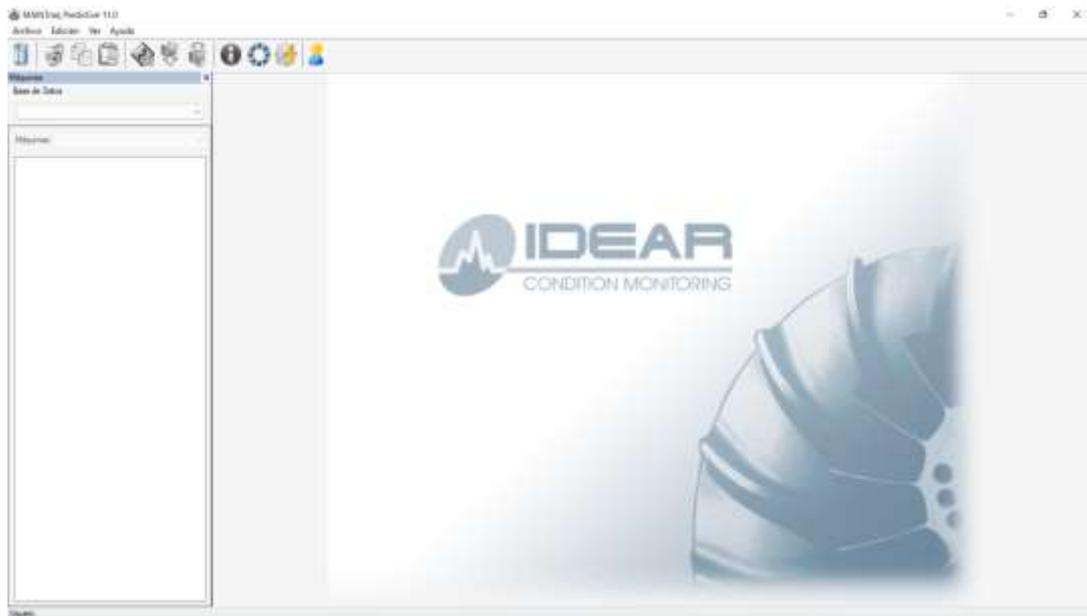


Ilustración 3-23: Menú principal software MAINTraQ Predictive

Fuente: Software MAINTraQ Predictive

3.12 Población y muestra

3.13 Población

En el contexto de esta investigación, el universo o población de estudio es infinita ya que sin importar la cantidad de mediciones que se realicen, siempre va a ser posible añadir una más, sin que se logre obtener una última medida.

3.14 Muestra

Para establecer cuántas mediciones se realizarán en cada posición es necesario calcular el tamaño de la muestra, para este propósito se utilizará la fórmula de tamaño de muestra con población infinita, para esto se han realizado un total de 28 mediciones al azar en la posición horizontal.

Fórmula del tamaño de la muestra n para estimar la media μ de poblaciones infinitas y σ desconocida (Hernández et al., 2024 pág. 126):

Ecuación 1-3: Tamaño de la muestra.

$$n = \frac{t_{\alpha/2}^2 * S^2}{E^2}$$

Donde:

$t_{\alpha/2}^2$ = es la puntuación t crítica basada en el nivel de confianza deseado

S = desviación estándar muestral

E = es el margen de error deseado

A continuación, se muestran los 28 datos tomados para el cálculo del tamaño de la muestra:

Tabla 3-3: Datos obtenidos de la vibración

# de medición	Velocidad de vibración (rms)
1	8,783
2	8,897
3	9,468
4	9,731
5	9,185
6	8,968
7	9,172
8	9,53
9	9,889
10	8,604
11	9,375
12	9,892
13	9,31
14	9,413
15	9,59
16	9,691
17	9,259
18	8,981
19	9,366
20	9,135
21	9,222
22	9,656
23	10,394
24	9,693
25	9,426
26	9,652
27	9,79
28	10,352

Realizado por: Orozco W., 2024.

3.14.1.1 Cálculo del tamaño de la muestra

Para el cálculo de la muestra se hará uso de un método estadístico aplicado en Python con los datos que se obtuvieron de las mediciones que se realizaron anteriormente, para ello se siguen los siguientes pasos:

Paso 1:

Lo primero que se realiza es la importación de las librerías necesarias, para esto se utilizará el siguiente código:

```
import numpy as np
import pandas as pd
import scipy.stats as stats
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
from tqdm import tqdm
```

Paso 2:

Se procede con la importación de los datos que se mostraron en la Tabla 3-2, los mismos que se encuentran en un archivo Excel llamado “Mediciones iniciales” al código en Python como se muestra a continuación:

```
excel = pd.ExcelFile('Mediciones iniciales.xlsx')

print(excel.sheet_names)
```

Paso 3:

Se crea una tabla denominada “vibraciones” donde se alojarán los datos que se importaron del archivo Excel como se muestra en el siguiente código

```
vibraciones = excel.parse('Hoja1')

excel.close()
```

Paso 4:

Se exploran los datos que se encuentran en la tabla anteriormente creada, en este caso por la función print se va a mostrar en el código los primeros 4 registros y los últimos 3 registros, esto debido a que en las funciones head() y tail() se colocaron los números 4 y 3 respectivamente como se muestra a continuación:

```
print(vibraciones.head(4))
```

```
print(vibraciones.tail(3))
```

```
medidas
0      8.783
1      8.897
2      9.468
3      9.731

medidas
25     9.652
26     9.790
27    10.352
```

Paso 5:

Se realiza la exploración informativa de la tabla creada, donde se podrá observar la información sobre esta como el número de datos, el número de filas y columnas, el tipo de datos, etc.

```
print(vibraciones.info())
```

```
<class 'pandas.core.frame.DataFrame'>
```

```
RangeIndex: 28 entries, 0 to 27
```

```
Data columns (total 1 columns):
```

#	Column	Non-Null Count	Dtype
0	medidas	28 non-null	float64

```
dtypes: float64(1)
```

```
memory usage: 356.0 bytes
```

```
None
```

Paso 6:

Se procede con la verificación de existencia de datos atípicos, en caso afirmativo se realiza un tratamiento, para dicha verificación se utiliza el código mostrado a continuación, el mismo que mostrará un diagrama de cajas en el cual se podrá observar la existencia o no de dichos datos.

```
plt.boxplot(vibraciones, labels=['medidas'],vert=True, patch_artist=True,  
notch = 'False')  
  
plt.xlabel('Muestra inicial')  
  
plt.ylabel('Amplitud global de vibraciones rms [mm/s]')  
  
plt.grid(True)  
  
plt.show()
```

Como se puede observar en el diagrama de cajas de la ilustración 3-22 no existen datos atípicos por lo que se continua con el procedimiento.

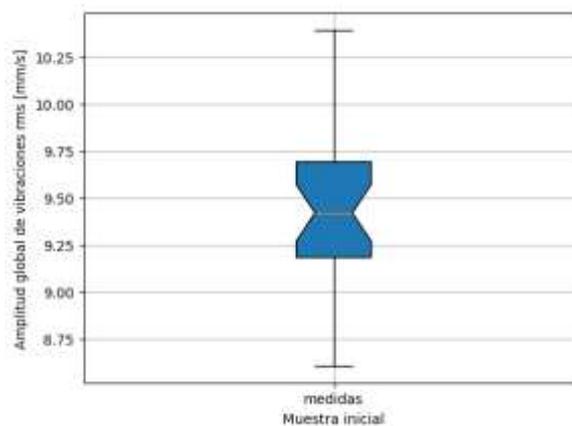


Ilustración 3-24: Diagrama de cajas de la muestra

Realizado por: Orozco W., 2024.

Paso 7:

Se realiza una prueba de normalidad a los datos de la tabla, esto con el fin de saber si dichos datos se ajustan a una distribución normal, para esto se usa la función stats.shapiro:

```
stats.shapiro(vibraciones['medidas'])
```

Para este caso después de realizar la prueba se obtuvo un p valor = 0.8283464669314123 el mismo que es mayor 0,05 por lo que los datos si se distribuyen normalmente con un 95% de confianza.

```
ShapiroResult(statistic=0.9791009380362443, pvalue=0.8283464669314123)
```

Paso 8:

Finalmente se procede a calcular el tamaño de la muestra aplicando la fórmula (3-1) antes mencionada para poblaciones infinitas en el código en Python como muestra a continuación:

```
error=0.15
p = 0.95                # 95% de confianza
sd = vibraciones.std()
df = len(vibraciones)-1 # grados de libertad
t_2=stats.t.ppf((p+1)/2, df) # t de alpha medios (t_α/2)
n = (t_2*sd/error)**2
np.ceil(n)              # primer entero superior
```

Luego de haber aplicado la fórmula en el código este da un resultado de 35 muestras, este será el número de mediciones que se tomarán en cada posición de la caja de rodamiento.

```
medidas    35.0
dtype: float64
```

3.15 Recolección de datos

3.15.1 Configuración del software MAINTraQ Predictive

Antes de empezar con la recolección de los datos de vibración radial es necesario configurar el software MAINTraQ Predictive que es en donde se va a ir almacenando los datos tomados, por ello es necesario seguir los siguientes pasos:

Paso 1:

El paso inicial consiste en crear una nueva base de datos para cada medida de vibración radial que se va a realizar en cada una de las posiciones, para esto se hace click en el icono superior izquierdo de la pantalla de inicio.

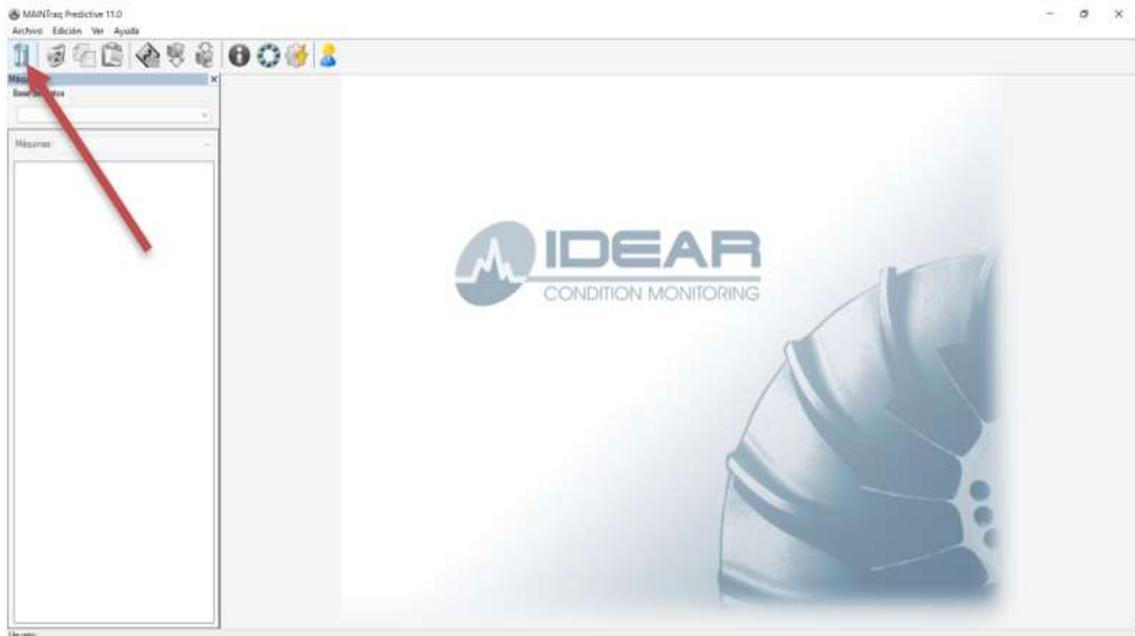


Ilustración 3-25: Creación de la base de datos

Realizado por: Orozco W., 2024.

Paso 2:

El programa mostrara una ventana en donde se procede a crear una base de datos nueva por cada lado de inclinación en donde se va a tomar la medida de vibración radial.

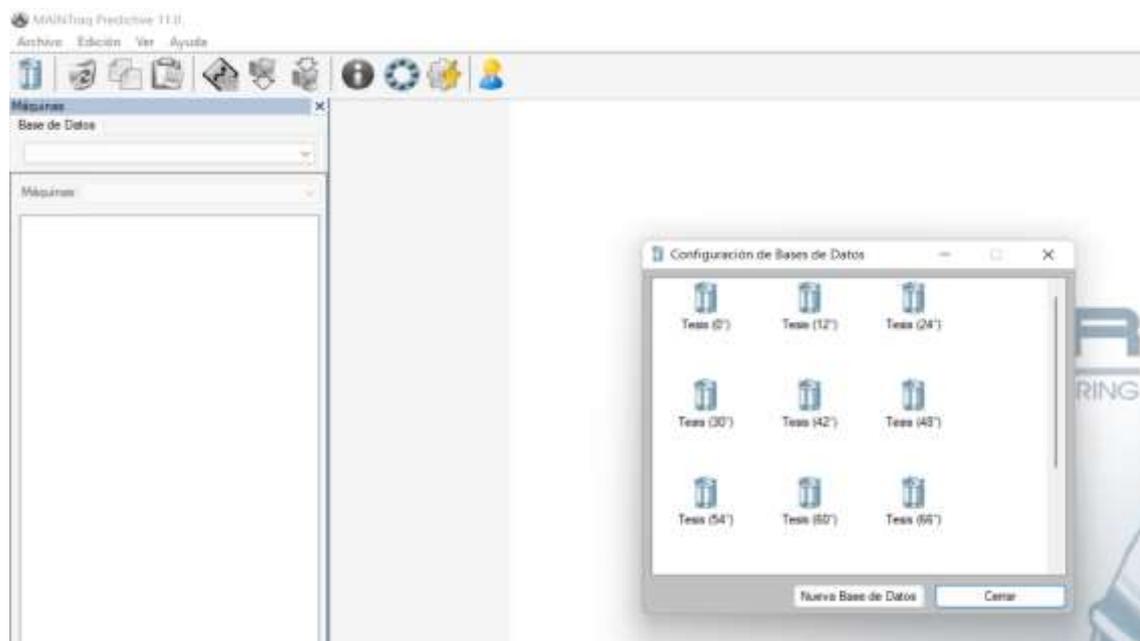


Ilustración 3-26: Bases de datos creadas por cada posición

Realizado por: Orozco W., 2024.

Paso 3:

Se procede a crear una carpeta nueva en cada una de las bases de datos que se crearon anteriormente

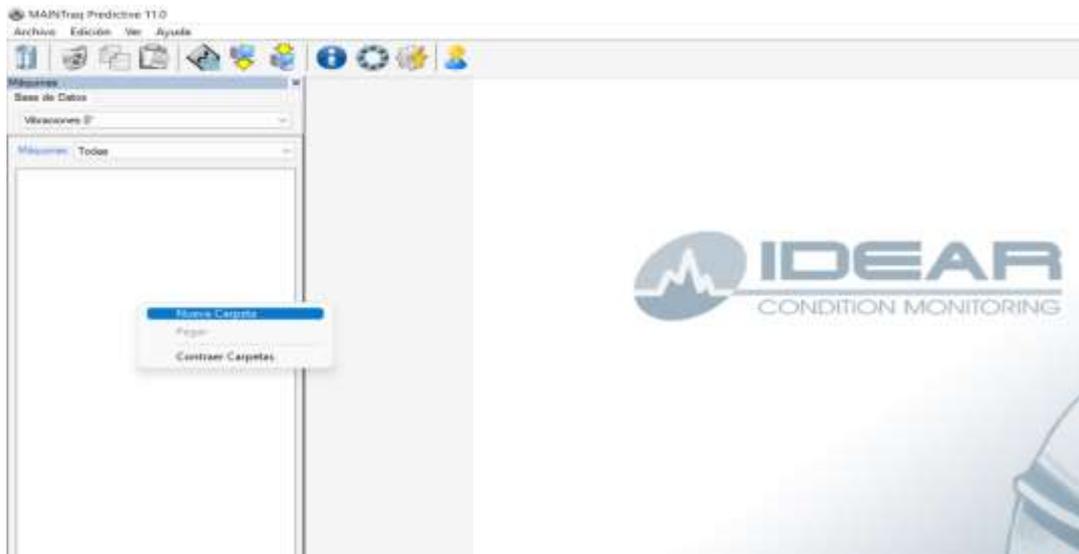


Ilustración 3-27: Creación de carpeta en la base de datos

Realizado por: Orozco W., 2024.

Paso 4:

Una vez creada la carpeta, dentro de esta se crea una “máquina” que en este caso se denominara “Módulo de rodamientos” en donde se van a registrar los datos



Ilustración 3-28: Creación de máquina en la carpeta

Realizado por: Orozco W., 2024.

Paso 5:

El programa mostrará una ventana en donde se debe configurar las especificaciones técnicas de la máquina que se acabó de crear, como el nombre que en este caso será “Vida acelerada”

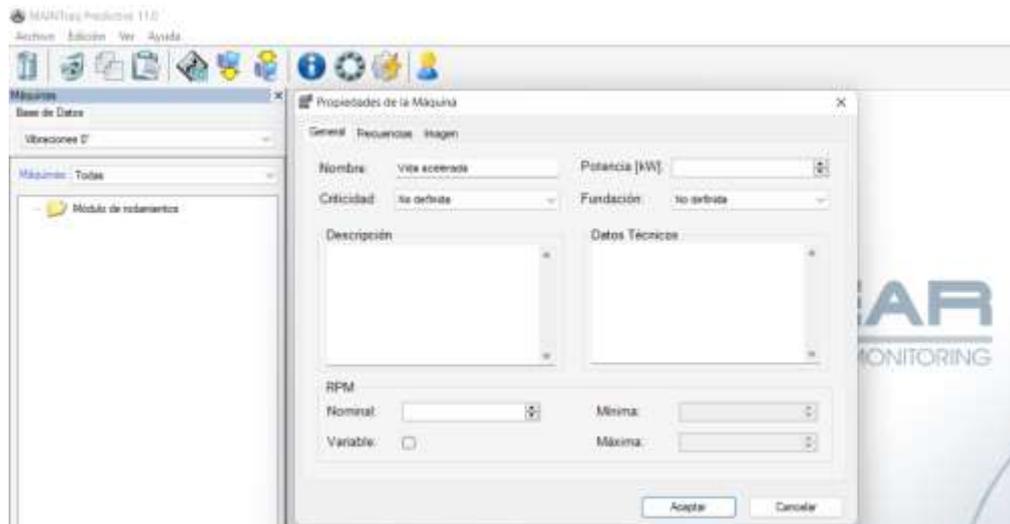


Ilustración 3-29: Especificaciones técnicas de la máquina

Realizado por: Orozco W., 2024.

Paso 6:

Una vez creada la máquina se proceden a crear los puntos de vibración, para esto se da click derecho sobre el nombre de la máquina que en este caso es “Vida acelerada” se selecciona la opción “Nuevo Punto” y se marca en la opción “De Vibraciones”



Ilustración 3-30: Creación del punto de vibración radial

Realizado por: Orozco W., 2024.

Paso 7:

El programa mostrará una ventana en donde se debe configurar todos los parámetros del nuevo punto de vibración creado como el nombre del punto que en este caso será “Radial”

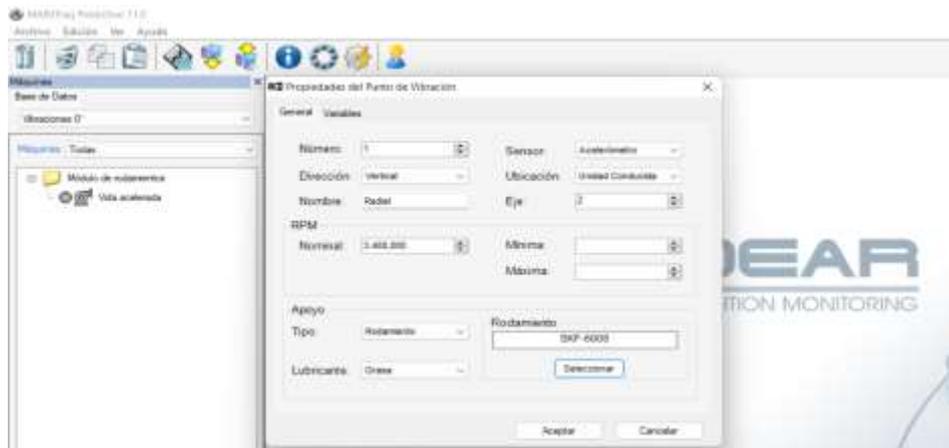


Ilustración 3-31: Parámetros del punto de vibración

Realizado por: Orozco W., 2024.

Paso 8:

Una vez creado el punto de vibración se procede a crear la forma de onda de cada una de las variables que se van a medir, para esto se debe hacer click derecho sobre el icono del punto de vibración creado anteriormente al cual se le denominó con el nombre “Radial” se elige la opción “Nuevo” y se marca la alternativa “Forma de Onda”

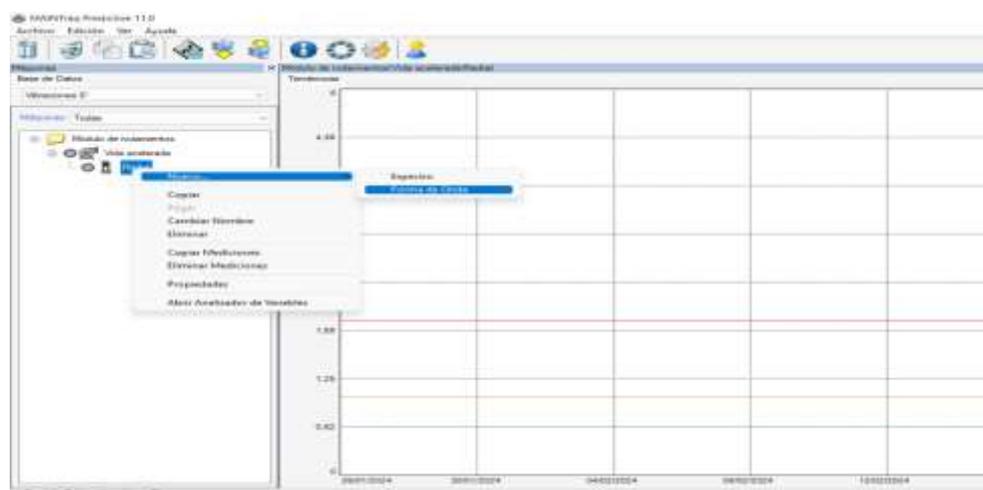


Ilustración 3-32: Creación de la forma de onda

Realizado por: Orozco W., 2024

Paso 9:

El programa mostrará una ventana en donde se debe configurar las propiedades de la forma onda de la variable que en este caso es la velocidad

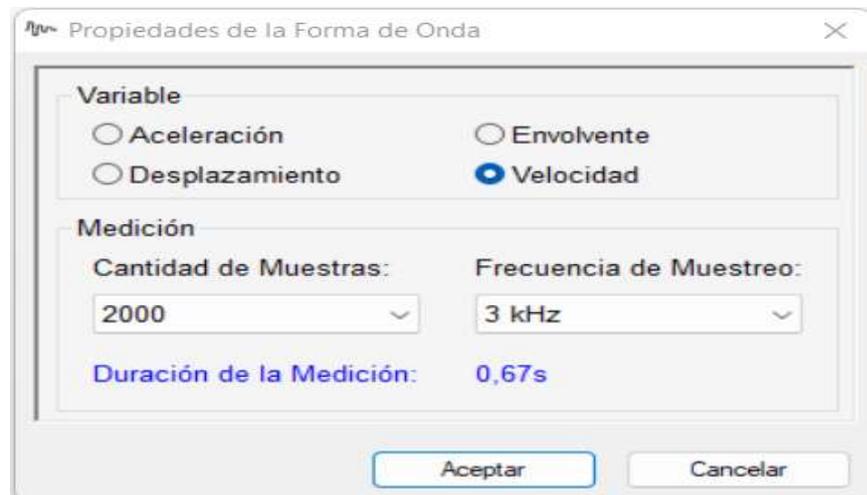


Ilustración 3-33: Configuración de las propiedades de la forma de onda

Realizado por: Orozco W., 2024.

El paso 8 y 9 se repite para la creación de la forma de onda de las variables restantes como lo son el desplazamiento, la aceleración y la envolvente

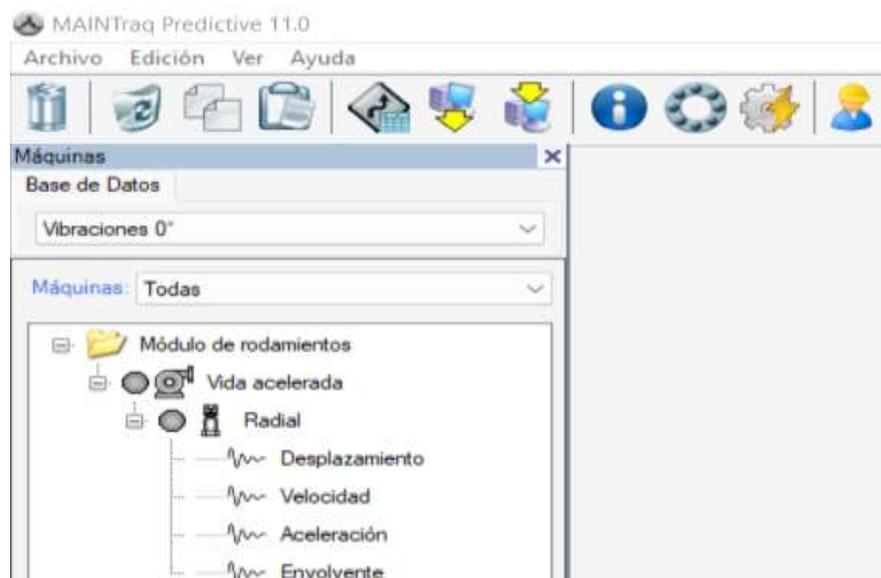


Ilustración 3-34: Creación de forma de onda para aceleración y envolvente

Realizado por: Orozco W., 2024.

Paso 10:

Luego de haber creado la forma de onda para cada una de las variables que se van a medir, se procede con la creación de los espectros de estas mismas variables, para esto debe hacer click sobre el icono del punto de vibración denominado “Radial” se selecciona la opción “Nuevo” y se marca en la opción de “Espectro”



Ilustración 3-35: Creación del espectro

Realizado por: Orozco W., 2024.

Paso 11:

El programa mostrará una ventana en donde se procede a la configuración de las propiedades del espectro de cada una de las variables, para este caso se configuró las propiedades del espectro de la variable velocidad



Ilustración 3-36: Propiedades del espectro

Realizado por: Orozco W., 2024.

El paso 10 y 11 se repite para la creación del espectro de las variables restantes como lo son el desplazamiento, la aceleración y la envolvente

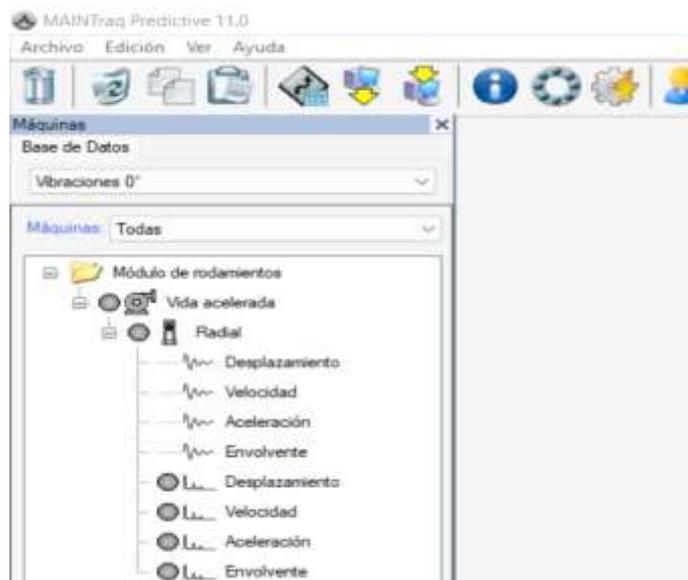


Ilustración 3-37: Creación del espectro de aceleración y envolvente

Realizado por: Orozco W., 2024.

Paso 12:

Una vez configurado todo lo necesario en el programa se procede a cargar la información al colector de datos para empezar con la toma de mediciones, para esto debe dar click sobre el icono que se denomina “Envío de datos”



Ilustración 3-38: Envío de datos

Realizado por: Orozco W., 2024.

Paso 13:

El programa mostrará una ventana en donde se debe seleccionar la máquina que se ha creado y en donde se configuro toda la información anterior para que esta sea enviada al colector de datos, para enviar dicha información se debe seleccionar el botón “Enviar al Colector de Datos”

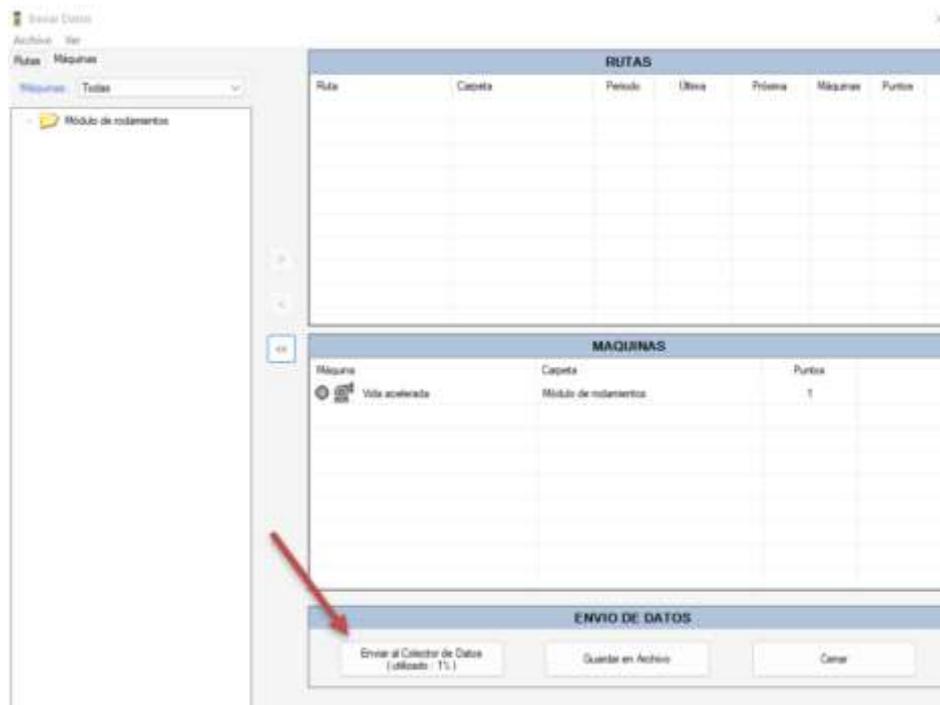


Ilustración 3-39: Envío de datos al colector

Realizado por: Orozco W., 2024.

Si los datos se han enviado correctamente el programa mostrará una ventana con un mensaje de confirmación.

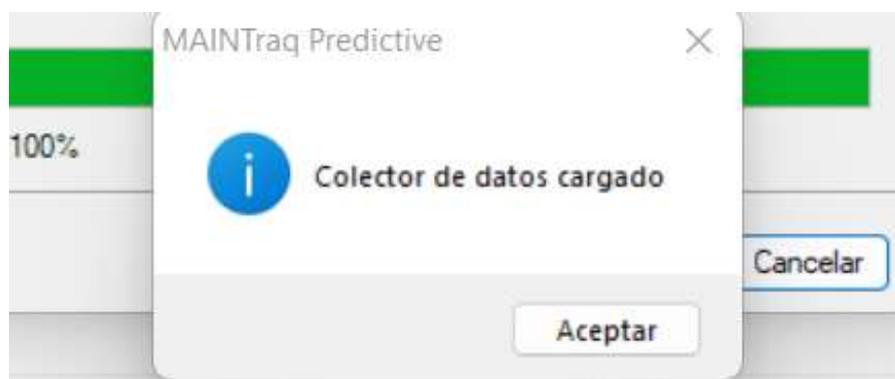


Ilustración 3-40 : Datos enviados correctamente

Realizado por: Orozco W., 2024.

3.15.2 Toma de mediciones de vibración radial

Una vez que se ha configurado todos los parámetros necesarios en el programa MAINTraq Predictive y se ha cargado toda la información al colector de datos, se procede con la toma de la medición de vibración radial en cada una de las posiciones.

3.15.2.1 Mediciones de vibración radial a 0°

A continuación, se detallan los pasos a seguir para tomar las mediciones de vibración radial a 0°

Paso 1:

La medición de vibración radial se inicia con la toma de los datos en la posición horizontal es decir sin variar el ángulo de inclinación a 0°, para esto se coloca el acelerómetro en dicha posición y se asegura que este quede bien sujeto de manera que no vaya a moverse.



Ilustración 3-41: Medición a 0°

Realizado por: Orozco W., 2024.

Paso 2:

Se enciende el motor del módulo y el vibracheck empezará a tomar las mediciones de cada una de las variables que se configuraron previamente



Ilustración 3-42: Lectura de datos

Realizado por: Orozco W., 2024.

Paso 3:

Una vez que el vibracheck haya terminado de tomar todas las mediciones se procede a subir esta información al programa, para esto se debe hacer click sobre el icono “Recepción de datos” en donde se seleccionara la opción “Desde Colector de Datos”



Ilustración 3-43: Recepción de datos

Realizado por: Orozco W., 2024.

Paso 4:

Una vez que se ha recibido toda la información en el programa desde el vibracheck se procede a dar click sobre el icono del espectro de velocidad, en donde se mostrará los datos tomados por el vibracheck específicamente el dato o la medición que se necesitará para esta investigación es el de la velocidad de vibración RMS, el cual se muestra al lado derecho del espectro.

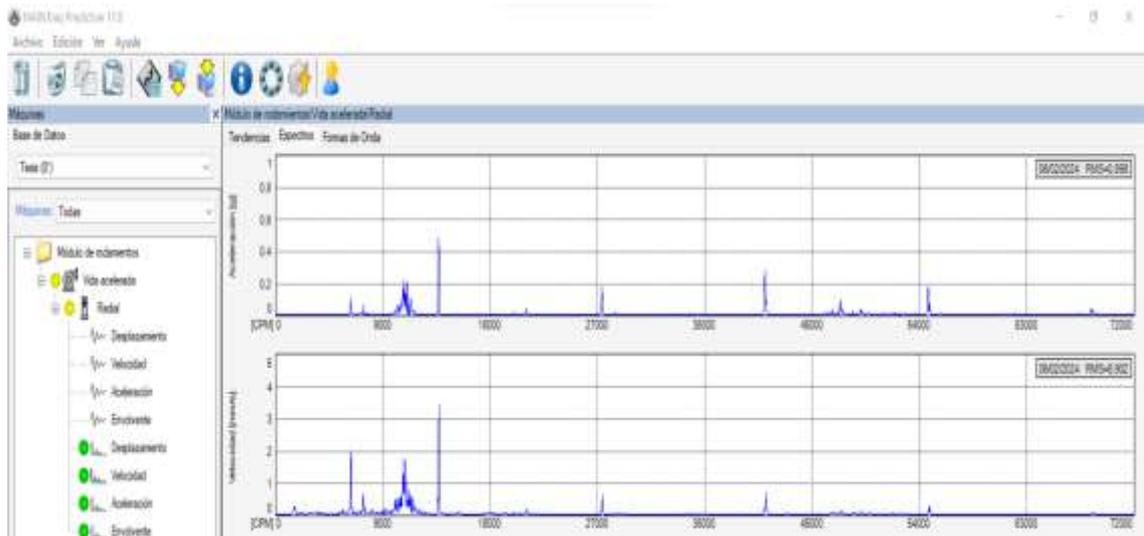


Ilustración 3-44: Espectro de velocidad tomada a 0°

Realizado por: Orozco W., 2024.

Este procedimiento se lo repite hasta obtener un número de 35 mediciones que fue el número que se calculó anteriormente como tamaño de la muestra

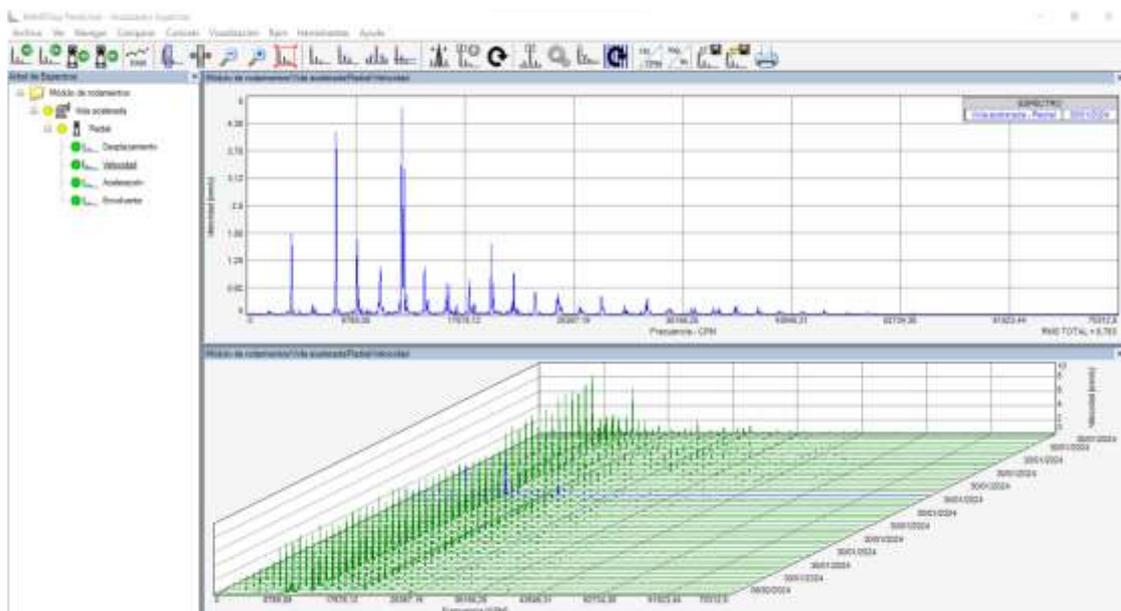


Ilustración 3-45: Mediciones de velocidad de vibración tomadas a 0°

Realizado por: Orozco W., 2024.

En la ilustración 3-45 se pueden observar cada uno de los espectros de las 35 mediciones de velocidad de vibración radial tomadas con el sensor en la posición inicial de referencia que es de 0°, es decir en la horizontal.

Tabla 3-4: Datos obtenidos por el vibracheck a 0°

Posición del sensor	# de medición	Velocidad de vibración (RMS)
0°	1	8,783
	2	8,897
	3	9,468
	4	9,731
	5	9,185
	6	8,968
	7	9,172
	8	9,53
	9	9,889
	10	9,375
	11	9,375
	12	9,892
	13	9,31
	14	9,413
	15	9,59
	16	9,691
	17	9,259
	18	8,981
	19	9,366
	20	9,135
	21	9,222
	22	9,656
	23	9,375
	24	9,693
	25	9,426
	26	9,652
	27	9,79
	28	9,375
	29	9,259
	30	9,695
	31	9,35
	32	9,295
	33	9,344
	34	9,371
	35	9,549

Realizado por: Orozco W., 2024.

Como se puede observar en la tabla 3-4 los valores de velocidad de vibración oscilan entre 8 y 10, siendo la medición #28 la que registra el valor más alto con un RMS =10,394 mientras que la medición # 10 registra el valor más bajo con un RMS = 8.604, en promedio, estos valores totalizan un RMS = 9.43, lo que según la norma ISO 10816-1 es un valor alto de velocidad de vibración.

3.15.2.2 *Mediciones de vibración radial a 6°*

A continuación, se detallan los pasos a seguir para tomar las mediciones de vibración radial a 6°:

Paso 1:

Se procede a colocar el acelerómetro para medir la velocidad de vibración radial a 6° con respecto a la primera medida que se tomó, es decir con respecto a la horizontal, se debe tomar muy en cuenta al momento de situar el sensor en dicha posición que este se encuentre bien sujeto a la caja del módulo de manera que no vaya a moverse de ninguna manera durante la toma de las mediciones.



Ilustración 3-46: Mediciones a 6°

Realizado por: Orozco W., 2024.

Una vez que se situó el acelerómetro en la posición respectiva, se procede a repetir los pasos 2 y 3 que se siguieron cuando se tomaron las mediciones de vibración radial a 0° que consistían encender el motor del módulo y empezar a tomar las mediciones y a recibir los datos tomados por el vibracheck en el programa.

Paso 2:

Luego de haber recibido la información en el programa de las mediciones tomadas por el vibracheck se procede a dar click sobre el icono del espectro de velocidad, en donde se mostrará los datos de velocidad RMS tomados por el vibracheck, el cual se encuentra al lado derecho del espectro.

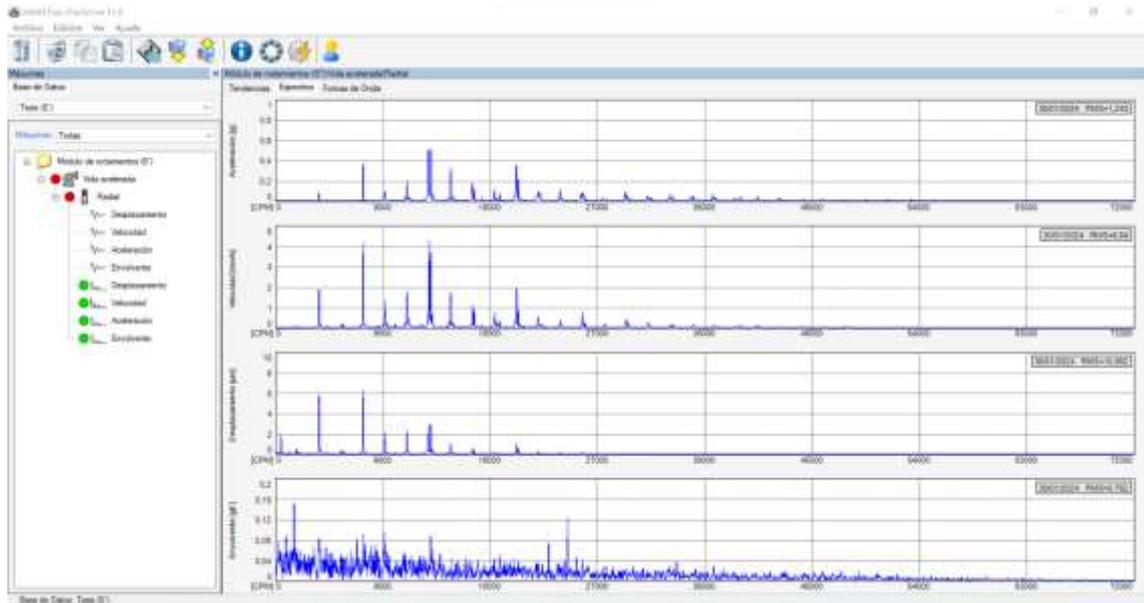


Ilustración 3-47: Espectro de velocidad de vibración tomada a 6°

Realizado por: Orozco W., 2024.

El procedimiento se repite hasta completar las 35 mediciones correspondientes a la posición de 6° con respecto a la horizontal.

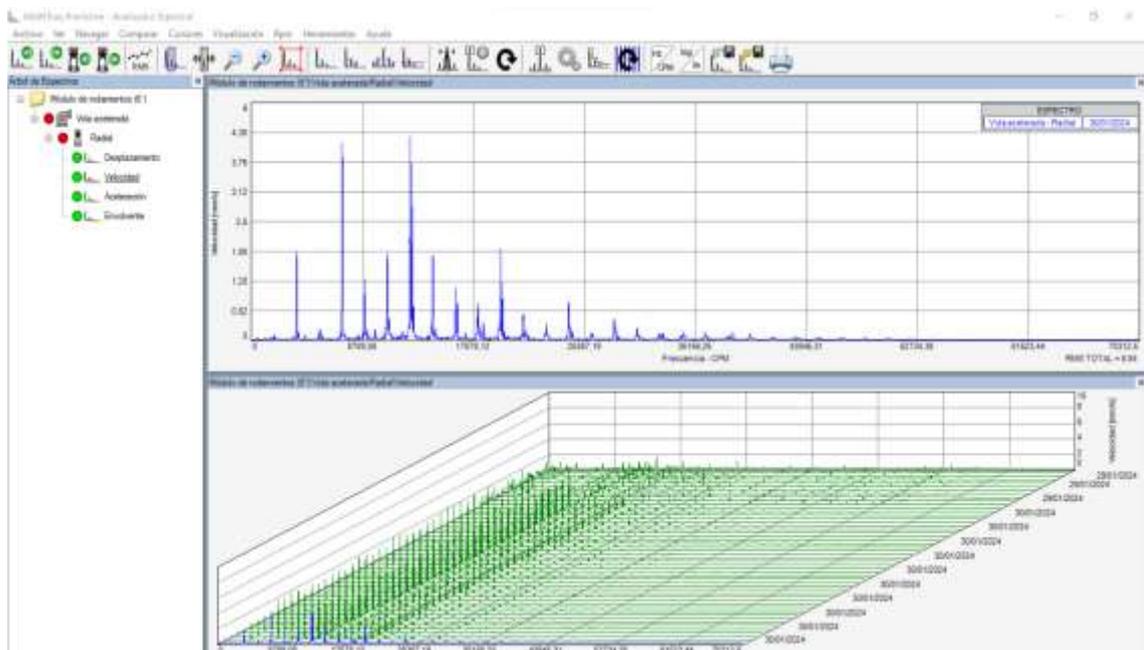


Ilustración 3-48: Mediciones de velocidad de vibración tomadas a 6°

Realizado por: Orozco W., 2024.

En la ilustración 3-48 se pueden observar cada uno de los espectros de las 35 mediciones tomadas en la posición de 6° con respecto a la horizontal.

A continuación, se muestra una tabla detallada de todas las mediciones tomadas en la posición de 6°:

Tabla 3-5: Datos obtenidos por el vibracheck a 6°

Posición del sensor	# de medición	Velocidad de vibración (RMS)
6°	1	9,215
	2	9,465
	3	9,283
	4	9,137
	5	9,446
	6	9,402
	7	9,775
	8	9,202
	9	9,934
	10	9,83
	11	9,65
	12	9,437
	13	9,003
	14	9,424
	15	9,845
	16	8,942
	17	9,426
	18	9,51
	19	9,512
	20	9,191
	21	8,985
	22	9,873
	23	9,042
	24	9,447
	25	9,275
	26	9,395
	27	9,937
	28	9,206
	29	9,275
	30	9,249
	31	9,499
	32	9,553
	33	9,818
	34	9,571
	35	8,84

Realizado por: Orozco W., 2024.

Como se observa en la tabla 3-5 los valores de velocidad de vibración oscilan entre 8 y 9, dando como resultado un promedio de velocidad de vibración RMS = 9.41, el mismo que es menor a la medida anterior tomada.

3.15.2.3 Mediciones de vibración radial a 12°

A continuación, se detallan los pasos a seguir para tomar las mediciones de vibración radial a 12°:

Paso 1:

Se procede a colocar el acelerómetro para medir la velocidad de vibración radial a 12° con respecto a la primera medida que se tomó, es decir con respecto a la horizontal, se debe tomar muy en cuenta al momento de situar el sensor en dicha posición que este se encuentre bien sujeto a la caja del módulo de manera que no vaya a moverse de ninguna manera durante la toma de las mediciones.



Ilustración 3-49: Mediciones a 12°

Realizado por: Orozco W., 2024.

Una vez que se situó el acelerómetro en la posición respectiva, se procede a repetir los pasos 2 y 3 que se siguieron cuando se tomaron las mediciones de vibración radial a 0° que consistían encender el motor del módulo y empezar a tomar las mediciones y a recibir los datos tomados por el vibracheck en el programa.

Paso 2:

Luego de haber recibido la información en el programa de las mediciones tomadas por el vibracheck se procede a dar click sobre el icono del espectro de velocidad, en donde se mostrará los datos de velocidad RMS tomados por el vibracheck, el cual se muestra al lado derecho del espectro.

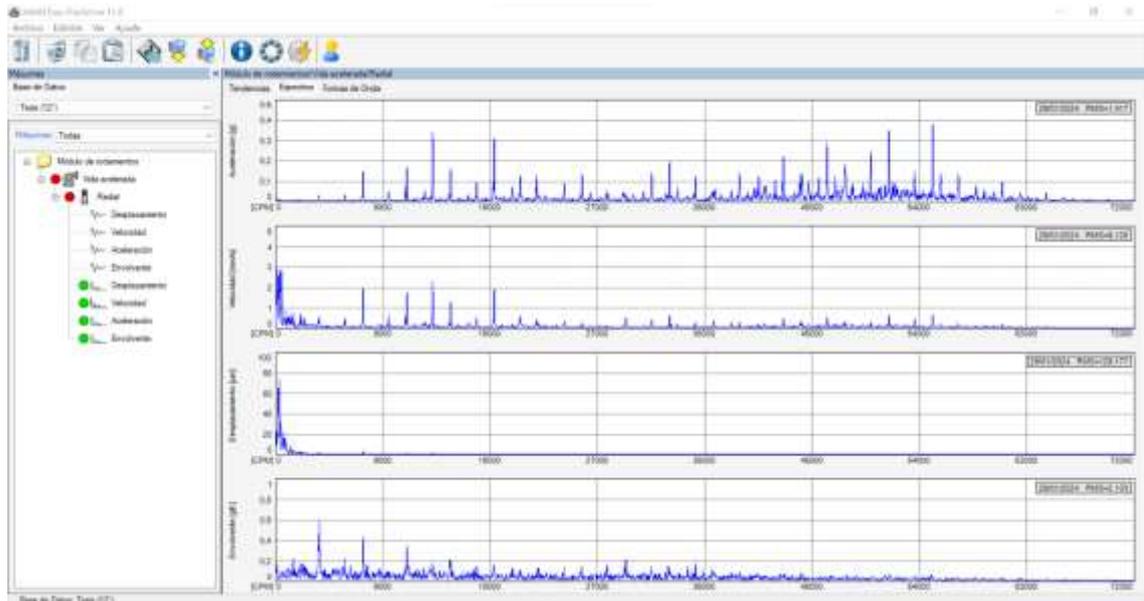


Ilustración 3-50: Espectro de velocidad de vibración tomada a 12°

Realizado por: Orozco W., 2024.

El procedimiento se repite hasta completar las 35 mediciones correspondientes a la posición de 12° con respecto a la horizontal.

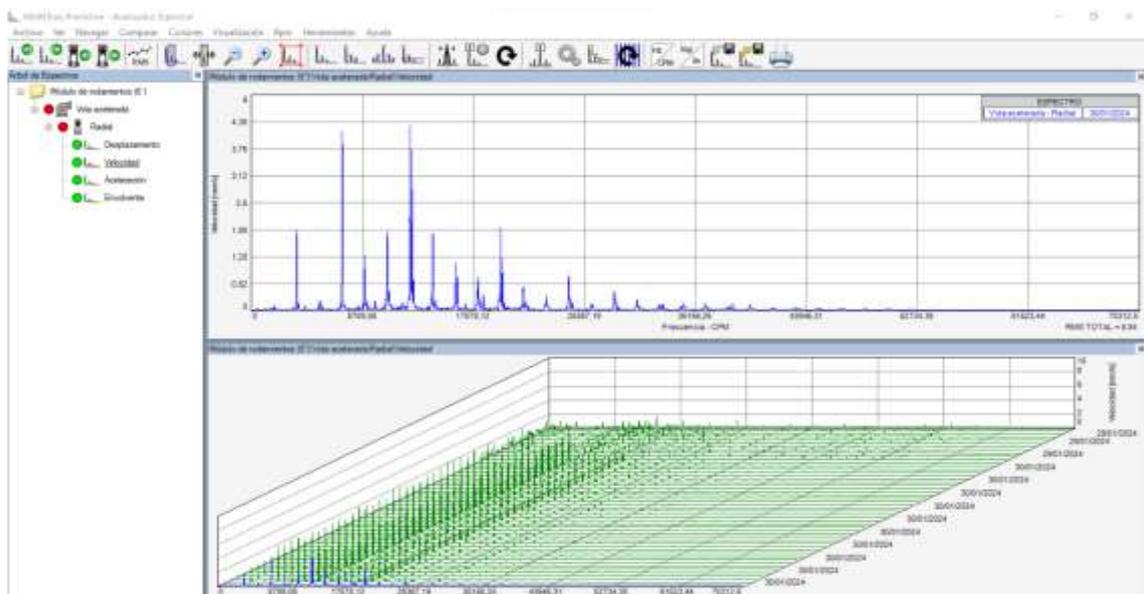


Ilustración 3-51: Mediciones de velocidad de vibración tomadas a 12°

Realizado por: Orozco W., 2024.

En la ilustración 3-51 se pueden observar cada uno de los espectros de las 35 mediciones de velocidad de vibración radial tomadas con el sensor en la posición correspondiente, es decir a 12° con respecto a la horizontal.

A continuación, se muestra una tabla detallada de todas las mediciones tomadas con el sensor en la posición de 12° respecto a la horizontal:

Tabla 3-6: Datos obtenidos por el vibracheck a 12°

Posición del sensor	# de medición	Velocidad de vibración (RMS)
12°	1	9,025
	2	9,175
	3	8,991
	4	9,22
	5	9,315
	6	9,195
	7	9,254
	8	8,89
	9	8,996
	10	9,657
	11	9,442
	12	9,347
	13	8,785
	14	9,075
	15	9,428
	16	8,85
	17	9,097
	18	9,68
	19	8,879
	20	9,347
	21	9,124
	22	9,587
	23	9,254
	24	9,337
	25	9,176
	26	9,272
	27	9,008
	28	9,115
	29	9,172
	30	9,004
	31	9,247
	32	9,192
	33	9,128
	34	8,895
	35	8,831

Realizado por: Orozco W., 2024.

Como se observa en la tabla 3-6 los valores de velocidad de vibración oscilan entre 8 y 9, dando como resultado un promedio de velocidad de vibración RMS = 9,17, el mismo que es menor a la medida anterior tomada.

3.15.2.4 Mediciones de vibración radial a 18°

A continuación, se detallan los pasos a seguir para tomar las mediciones de vibración radial a 18°:

Paso 1:

Se procede a colocar el acelerómetro para medir la velocidad de vibración radial a 18° con respecto a la primera medida que se tomó, es decir con respecto a la horizontal, se debe tomar muy en cuenta al momento de situar el sensor en dicha posición que este se encuentre bien sujeto a la caja del módulo de manera que no vaya a moverse de ninguna manera durante la toma de las mediciones.



Ilustración 3-52: Mediciones a 18°

Realizado por: Orozco W., 2024.

Una vez que se situó el acelerómetro en la posición respectiva, se procede a repetir los pasos 2 y 3 que se siguieron cuando se tomaron las mediciones de vibración radial a 0° que consistían encender el motor del módulo y empezar a tomar las mediciones y a recibir los datos tomados por el vibracheck en el programa.

Paso 2:

Luego de haber recibido la información en el programa de las mediciones tomadas por el vibracheck se procede a dar click sobre el icono del espectro de velocidad, en donde se mostrará los datos de velocidad RMS tomados por el vibracheck, el cual se muestra al lado derecho del espectro.

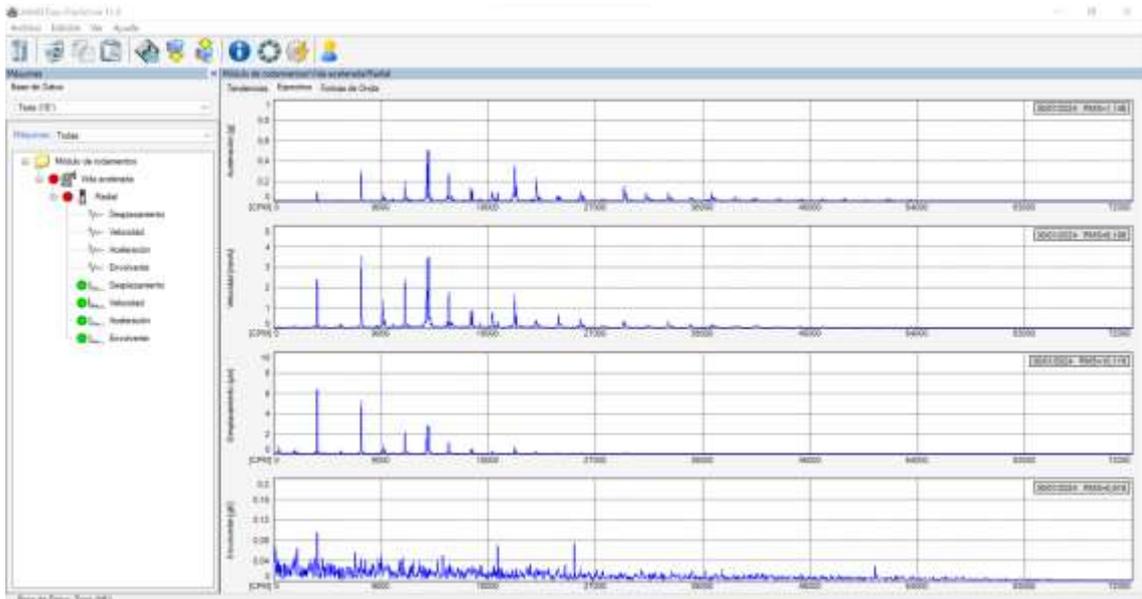


Ilustración 3-53: Espectro de velocidad de vibración tomada a 18°

Realizado por: Orozco W., 2024.

El procedimiento se repite hasta completar las 35 mediciones correspondientes a la posición de 18° con respecto a la horizontal.

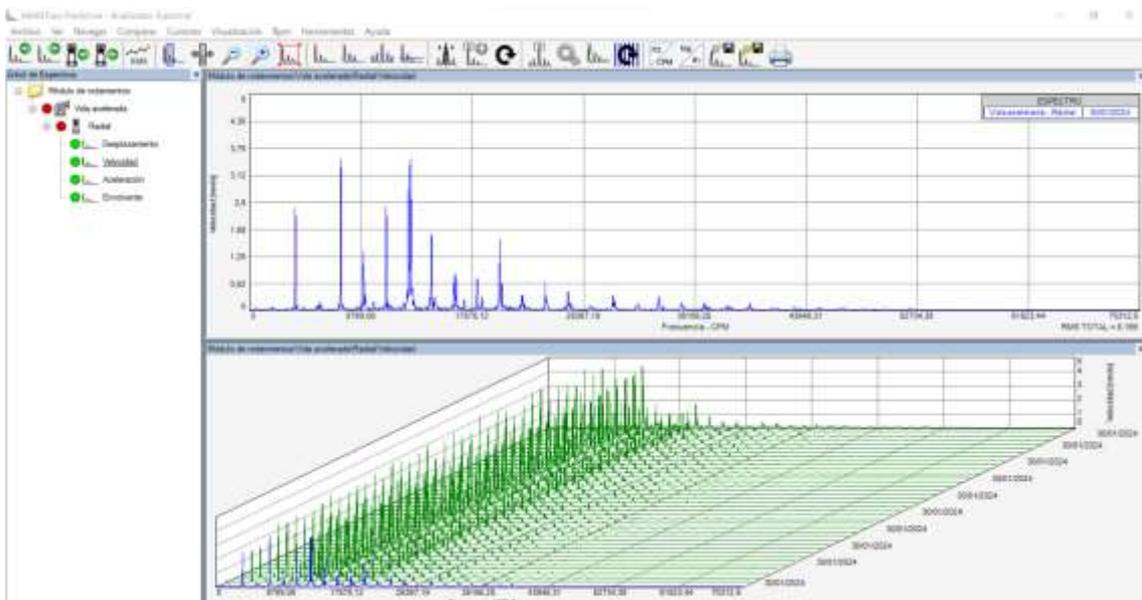


Ilustración 3-54: Mediciones de velocidad de vibración tomadas a 18°

Realizado por: Orozco W., 2024.

En la ilustración 3-54 se observa cada uno de los espectros de las 35 mediciones de velocidad de vibración radial tomadas con el sensor a 18° con respecto a la horizontal.

A continuación, se muestra una tabla detallada de todas las mediciones tomadas en la posición de 18°:

Tabla 3-7: Datos obtenidos por el vibracheck a 18°

Posición del sensor	# de medición	Velocidad de vibración (RMS)
18°	1	8,722
	2	8,199
	3	9,159
	4	8,788
	5	8,893
	6	8,392
	7	9,2
	8	9,142
	9	8,991
	10	8,276
	11	8,676
	12	8,941
	13	8,938
	14	9,231
	15	9,212
	16	9,084
	17	9,234
	18	8,807
	19	8,115
	20	8,603
	21	8,866
	22	8,315
	23	9,244
	24	8,736
	25	8,407
	26	8,742
	27	8,81
	28	9,164
	29	8,682
	30	8,442
	31	8,572
	32	8,959
	33	8,523
	34	9,039
	35	9,016

Realizado por: Orozco W., 2024.

Como se observa en la tabla 3-7 los valores de velocidad de vibración oscilan entre 8 y 9, dando como resultado un promedio de velocidad de vibración RMS = 8.803, el mismo que es menor a la medida anterior tomada.

3.15.2.5 Mediciones de vibración radial a 24°

A continuación, se detallan los pasos a seguir para tomar las mediciones de vibración radial a 24°:

Paso 1:

Se procede a colocar el acelerómetro para medir la velocidad de vibración radial a 24° con respecto a la primera medida que se tomó, es decir con respecto a la horizontal, se debe tomar muy en cuenta al momento de situar el sensor en dicha posición que este se encuentre bien sujeto a la caja del módulo de manera que no vaya a moverse de ninguna manera durante la toma de las mediciones.



Ilustración 3-55: Mediciones a 24°

Realizado por: Orozco W., 2024.

Una vez que se situó el acelerómetro en la posición respectiva, se procede a repetir los pasos 2 y 3 que se siguieron cuando se tomaron las mediciones de vibración radial a 0° que consistían encender el motor del módulo y empezar a tomar las mediciones y a recibir los datos tomados por el vibracheck en el programa.

Paso 2:

Luego de haber recibido la información en el programa de las mediciones tomadas por el vibracheck se procede a dar click sobre el icono del espectro de velocidad, en donde se mostrará los datos de velocidad RMS tomados por el vibracheck, el cual se muestra al lado derecho del espectro.

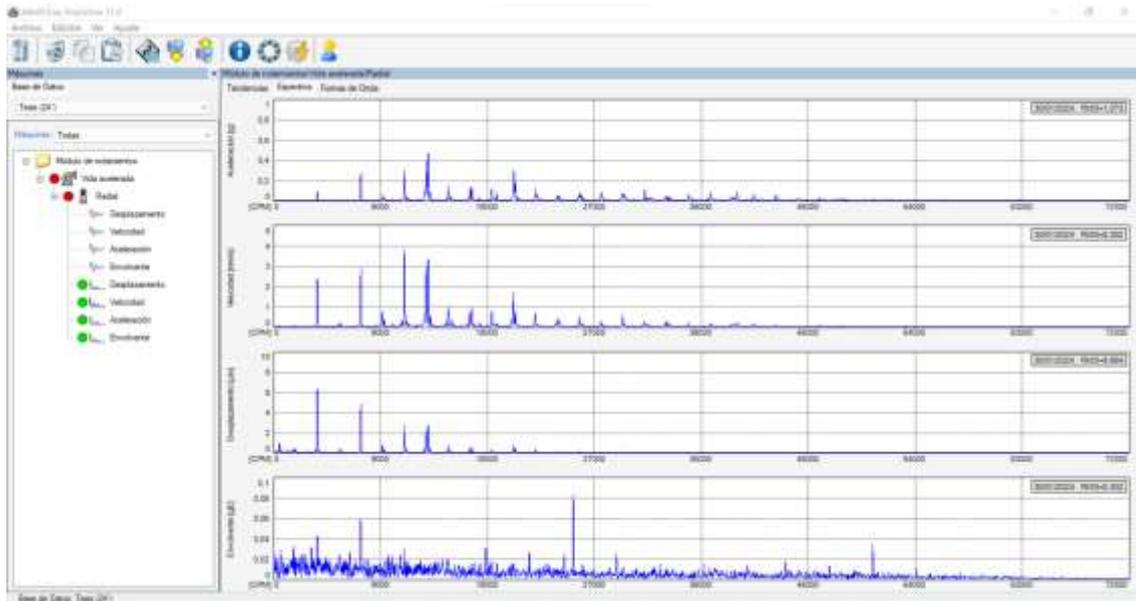


Ilustración 3-56: Espectro de velocidad de vibración tomada a 24°

Realizado por: Orozco W., 2024.

El procedimiento se repite hasta completar las 35 mediciones correspondientes a la posición de 24° con respecto a la horizontal

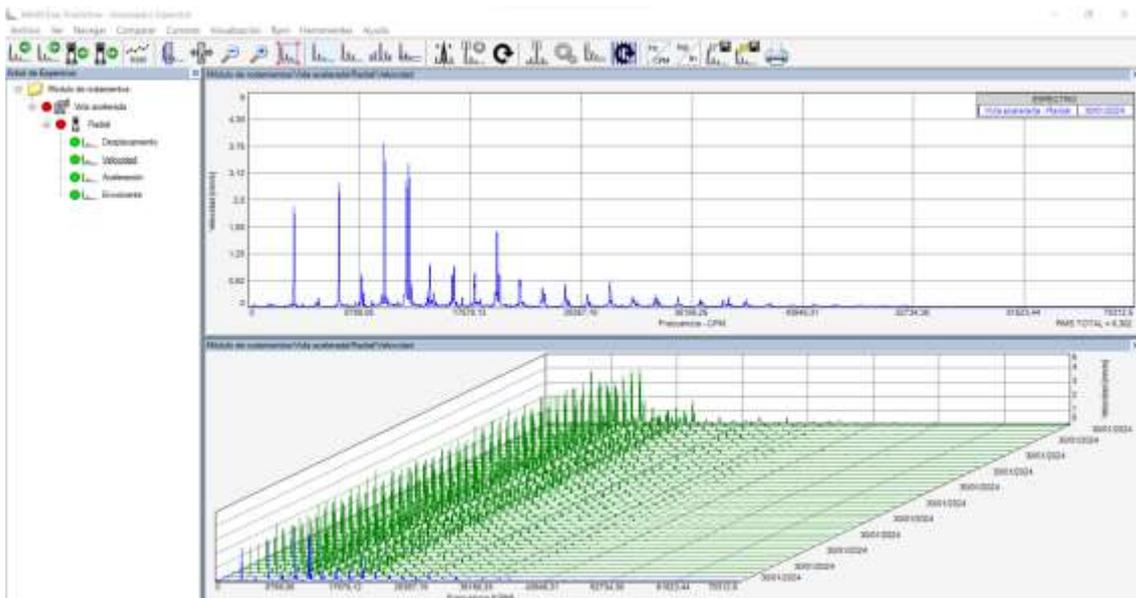


Ilustración 3-57: Mediciones de velocidad de vibración tomadas a 24°

Realizado por: Orozco W., 2024.

En la ilustración 3-57 se pueden observar cada uno de los espectros de las 35 mediciones de velocidad de vibración radial tomadas con el sensor en la posición correspondiente, es decir a 24° con respecto a la horizontal.

A continuación, se muestra una tabla detallada de todas las mediciones tomadas en la posición de 24°

Tabla 3-8: Datos obtenidos por el vibracheck a 24°

Posición del sensor	# de medición	Velocidad de vibración (RMS)
24°	1	8,254
	2	8,257
	3	8,806
	4	8,816
	5	8,711
	6	8,202
	7	8,547
	8	8,13
	9	8,306
	10	8,653
	11	8,9
	12	8,743
	13	9,012
	14	8,799
	15	8,834
	16	8,758
	17	8,356
	18	8,859
	19	8,363
	20	8,787
	21	8,677
	22	8,463
	23	8,527
	24	8,493
	25	8,781
	26	9,503
	27	9,045
	28	9,034
	29	8,302
	30	8,826
	31	8,164
	32	8,992
	33	8,735
	34	8,987
	35	8,08

Realizado por: Orozco W., 2024.

Como se observa en la tabla 3-8 los valores de velocidad de vibración oscilan entre 8 y 9, dando como resultado un promedio de velocidad de vibración RMS = 8.64, el mismo que es menor a la medida anterior tomada.

3.15.2.6 Mediciones de vibración radial a 30°

A continuación, se detallan los pasos a seguir para tomar las mediciones de vibración radial a 30°

Paso 1:

Se procede a colocar el acelerómetro para medir la velocidad de vibración radial a 30° con respecto a la primera medida que se tomó, es decir con respecto a la horizontal, se debe tomar muy en cuenta al momento de situar el sensor en dicha posición que este se encuentre bien sujeto a la caja del módulo de manera que no vaya a moverse de ninguna manera durante la toma de las mediciones.



Ilustración 3-58: Mediciones a 30°

Realizado por: Orozco W., 2024.

Una vez que se situó el acelerómetro en la posición respectiva, se procede a repetir los pasos 2 y 3 que se siguieron cuando se tomaron las mediciones de vibración radial a 0° que consistían encender el motor del módulo y empezar a tomar las mediciones y a recibir los datos tomados por el vibracheck en el programa.

Paso 2:

Luego de haber recibido la información en el programa de las mediciones tomadas por el vibracheck se procede a dar click sobre el icono del espectro de velocidad, en donde se mostrará los datos de velocidad RMS tomados por el vibracheck, el cual se muestra al lado derecho del espectro

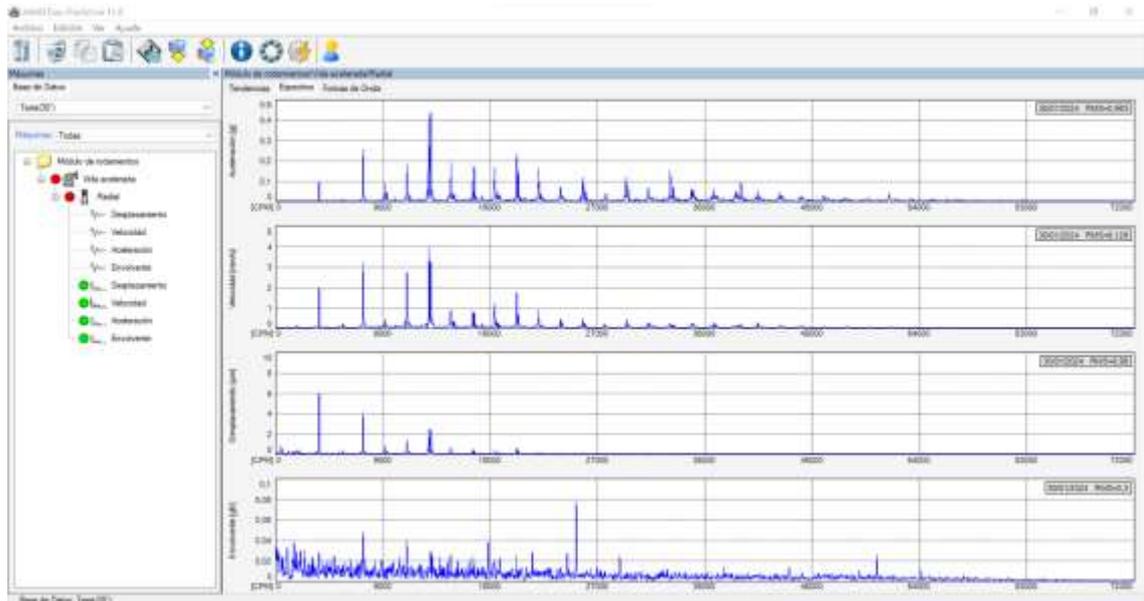


Ilustración 3-59: Espectro de velocidad de vibración tomada a 30°

Realizado por: Orozco W., 2024.

El procedimiento se repite hasta completar las 35 mediciones correspondientes a la posición de 30° con respecto a la horizontal

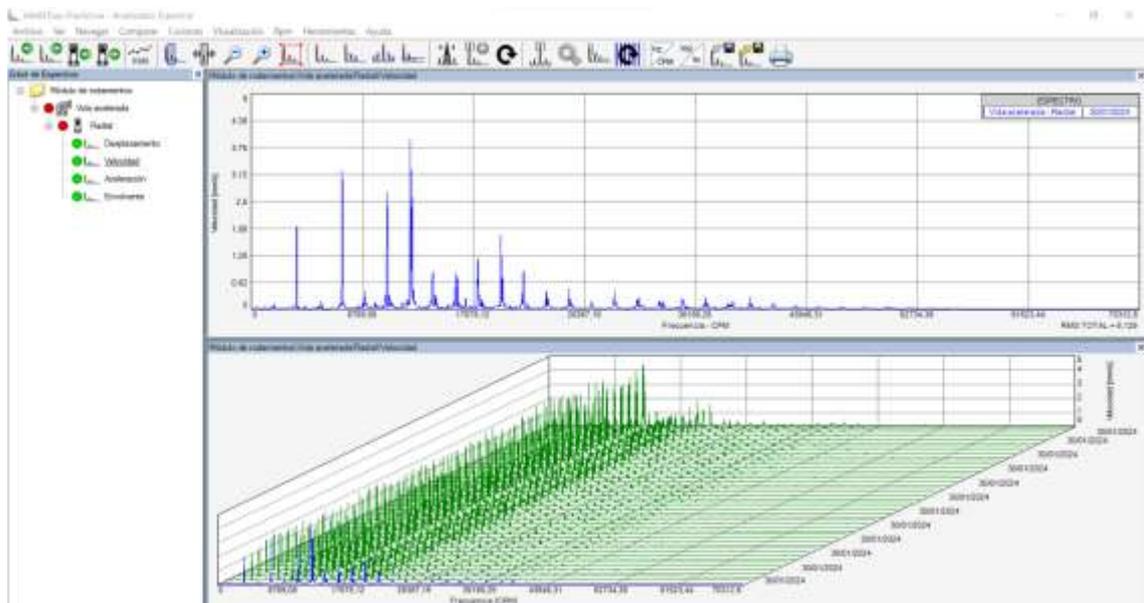


Ilustración 3-60: Mediciones de velocidad de vibración tomadas a 30°

Realizado por: Orozco W., 2024.

En la ilustración 3-60 se pueden observar cada uno de los espectros de las 35 mediciones de velocidad de vibración radial tomadas con el sensor en la posición correspondiente, es decir a 30° con respecto a la horizontal.

A continuación, se muestra una tabla detallada de todas las mediciones tomadas en la posición de 30°:

Tabla 3-9: Datos obtenidos por el vibracheck a 30°

Posición del sensor	# de medición	Velocidad de vibración (RMS)
30°	1	7,824
	2	7,312
	3	8,49
	4	8,136
	5	7,675
	6	8,085
	7	7,476
	8	8,129
	9	7,6
	10	8,296
	11	7,824
	12	7,986
	13	7,767
	14	7,879
	15	8,094
	16	7,742
	17	7,631
	18	7,583
	19	7,476
	20	8,469
	21	7,227
	22	7,437
	23	7,602
	24	7,757
	25	8,245
	26	7,848
	27	7,447
	28	7,615
	29	7,815
	30	7,247
	31	7,688
	32	7,307
	33	7,594
	34	7,511
	35	7,132

Realizado por: Orozco W., 2024.

Como se observa en la tabla 3-9 los valores de velocidad de vibración oscilan entre 7 y 8, dando como resultado un promedio de velocidad de vibración RMS = 7.74, el mismo que es menor a la medida anterior tomada.

3.15.2.7 Mediciones de vibración radial a 36°

A continuación, se detallan los pasos a seguir para tomar las mediciones de vibración radial a 36°

Paso 1:

Se procede a colocar el acelerómetro para medir la velocidad de vibración radial a 36° con respecto a la primera medida que se tomó, es decir con respecto a la horizontal, se debe tomar muy en cuenta al momento de situar el sensor en dicha posición que este se encuentre bien sujeto a la caja del módulo de manera que no vaya a moverse de ninguna manera durante la toma de las mediciones.



Ilustración 3-61: Mediciones a 36°

Realizado por: Orozco W., 2024.

Una vez que se situó el acelerómetro en la posición respectiva, se procede a repetir los pasos 2 y 3 que se siguieron cuando se tomaron las mediciones de vibración radial a 0° que consistían encender el motor del módulo y empezar a tomar las mediciones y a recibir los datos tomados por el vibracheck en el programa.

Paso 2:

Luego de haber recibido la información en el programa de las mediciones tomadas por el vibracheck se procede a dar click sobre el icono del espectro de velocidad, en donde se mostrará los datos de velocidad RMS tomados por el vibracheck, el cual se muestra al lado derecho del espectro.

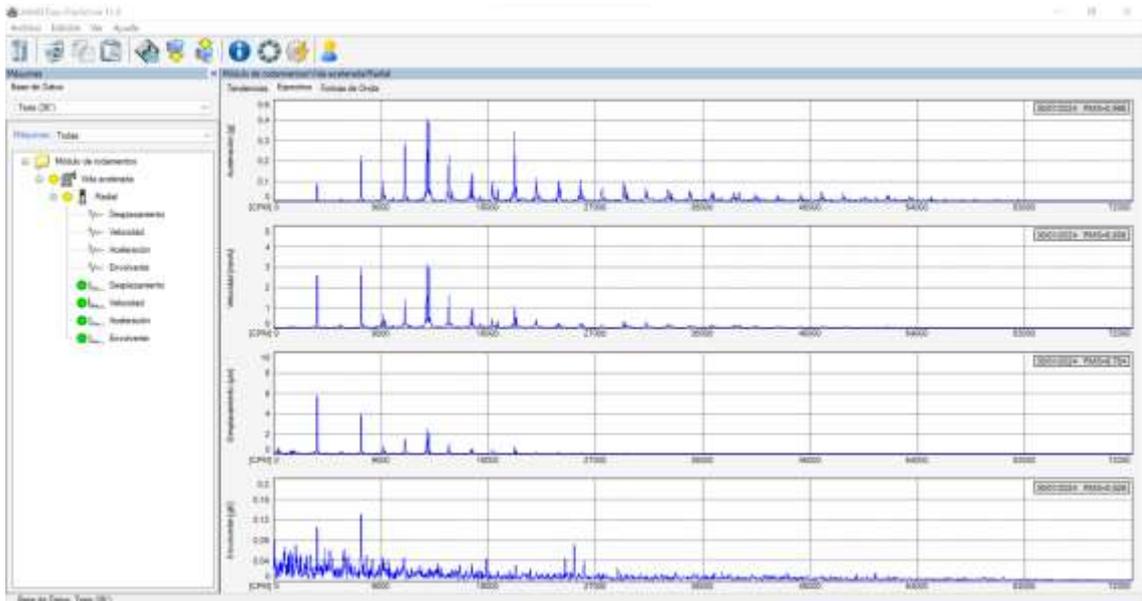


Ilustración 3-62: Espectro de velocidad de vibración tomada a 36°

Realizado por: Orozco W., 2024.

El procedimiento se repite hasta completar las 35 mediciones correspondientes a la posición de 36° con respecto a la horizontal.

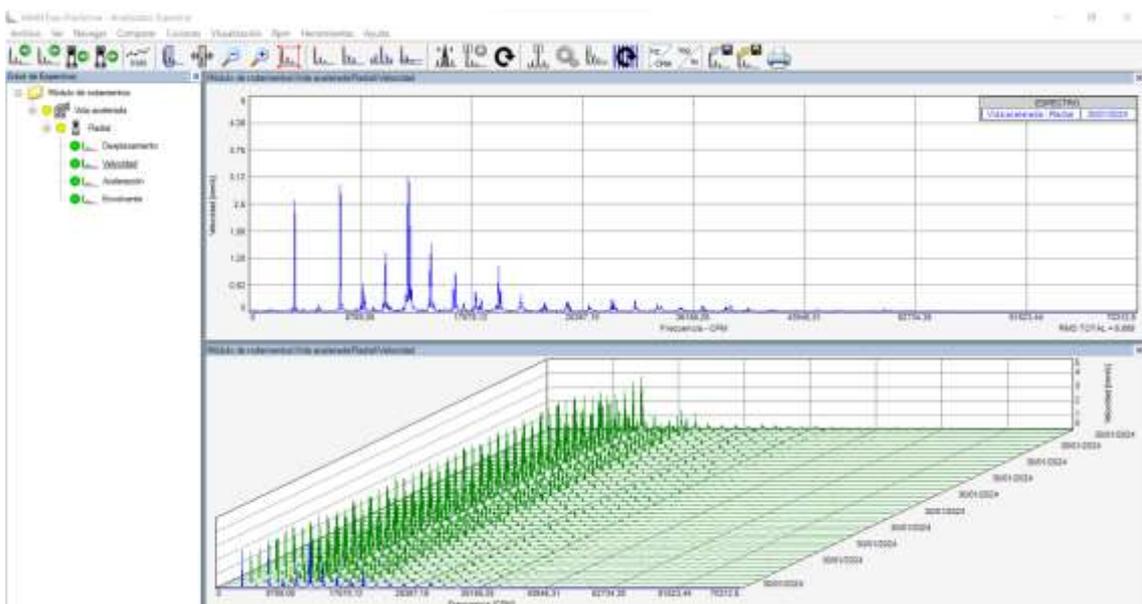


Ilustración 3-63: Mediciones de velocidad de vibración tomadas a 36°

Realizado por: Orozco W., 2024.

En la ilustración 3-63 se pueden observar cada uno de los espectros de las 35 mediciones de velocidad de vibración radial tomadas con el sensor en la posición correspondiente, es decir a 36° con respecto a la horizontal.

A continuación, se muestra una tabla detallada de todas las mediciones tomadas en la posición de 36°:

Tabla 3-10: Datos obtenidos por el vibracheck a 36°

Posición del sensor	# de medición	Velocidad de vibración (RMS)
36°	1	6,985
	2	6,781
	3	7,481
	4	7,426
	5	6,635
	6	7,106
	7	6,76
	8	7,388
	9	7,469
	10	7,153
	11	7,12
	12	7,3
	13	7,049
	14	6,756
	15	7,032
	16	7,096
	17	7,518
	18	7,765
	19	7,413
	20	6,824
	21	6,835
	22	6,937
	23	6,661
	24	7,294
	25	7,438
	26	7,521
	27	7,392
	28	7,331
	29	7,731
	30	6,955
	31	6,884
	32	7,703
	33	7,477
	34	7,538
	35	6,793

Realizado por: Orozco W., 2024.

Como se observa en la tabla 3-10 los valores de velocidad de vibración oscilan entre 6 y 7, dando como resultado un promedio de velocidad de vibración RMS = 7.18, el mismo que es menor a la medida anterior tomada.

3.15.2.8 Mediciones de vibración radial a 42°

A continuación, se detallan los pasos a seguir para tomar las mediciones de vibración radial a 42°

Paso 1:

Se procede a colocar el acelerómetro para medir la velocidad de vibración radial a 42° con respecto a la primera medida que se tomó, es decir con respecto a la horizontal, se debe tomar muy en cuenta al momento de situar el sensor en dicha posición que este se encuentre bien sujeto a la caja del módulo de manera que no vaya a moverse de ninguna manera durante la toma de las mediciones.



Ilustración 3-64: Mediciones a 42°

Realizado por: Orozco W., 2024.

Una vez que se situó el acelerómetro en la posición respectiva, se procede a repetir los pasos 2 y 3 que se siguieron cuando se tomaron las mediciones de vibración radial a 0° que consistían encender el motor del módulo y empezar a tomar las mediciones y a recibir los datos tomados por el vibracheck en el programa.

Paso 2:

Luego de haber recibido la información en el programa de las mediciones tomadas por el vibracheck se procede a dar click sobre el icono del espectro de velocidad, en donde se mostrará los datos de velocidad RMS tomados por el vibracheck, el cual se muestra al lado derecho del espectro.

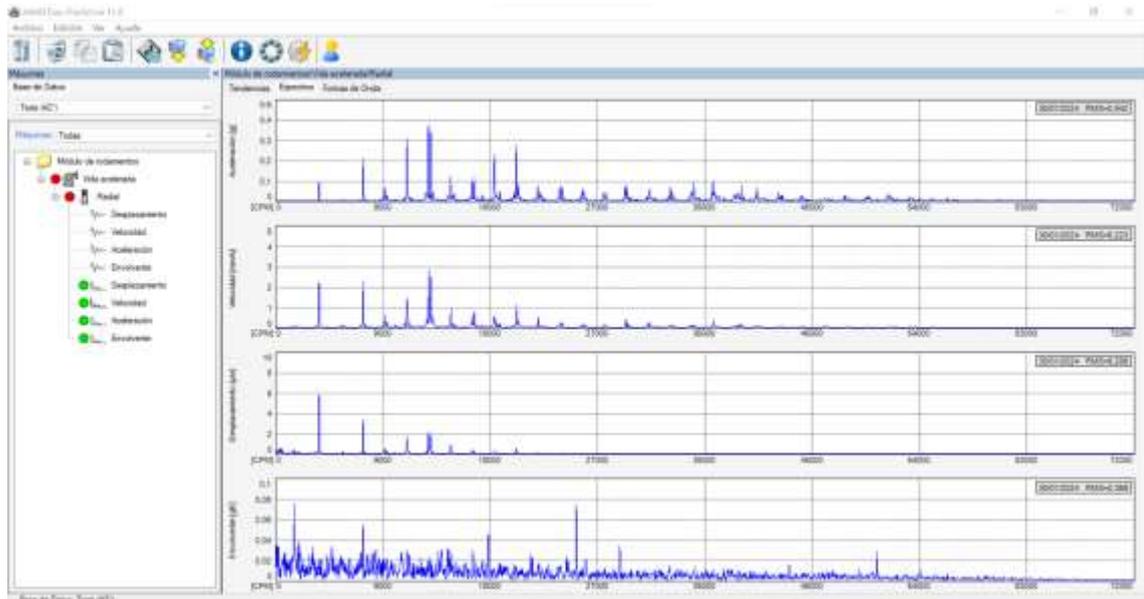


Ilustración 3-65: Espectro de velocidad de vibración tomada a 42°

Realizado por: Orozco W., 2024.

El procedimiento se repite hasta completar las 35 mediciones correspondientes a la posición de 42° con respecto a la horizontal.

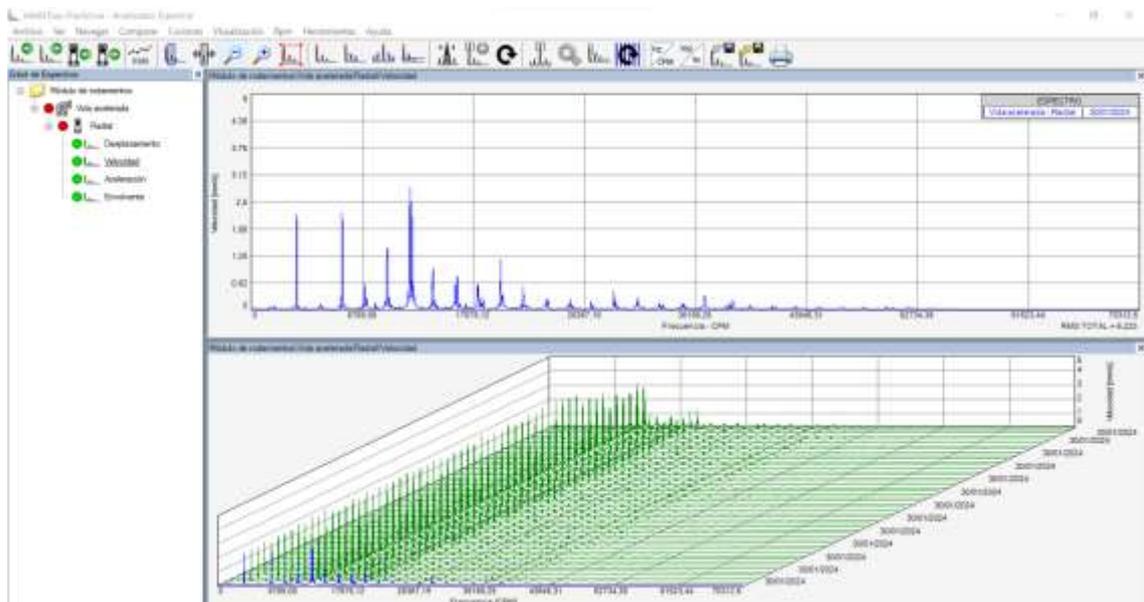


Ilustración 3-66: Mediciones de velocidad de vibración tomadas a 42°

Realizado por: Orozco W., 2024.

En la ilustración 3-66 se pueden observar cada uno de los espectros de las 35 mediciones de velocidad de vibración radial tomadas con el sensor en la posición correspondiente, es decir a 42° con respecto a la horizontal.

A continuación, se muestra una tabla detallada de todas las mediciones tomadas en la posición de 42°:

Tabla 3-11: Datos obtenidos por el vibracheck a °42

Posición del sensor	# de medición	Velocidad de vibración (RMS)
42°	1	6,195
	2	6,622
	3	6,351
	4	6,278
	5	6,623
	6	6,235
	7	6,334
	8	6,89
	9	6,366
	10	6,041
	11	6,124
	12	6,559
	13	6,426
	14	6,671
	15	6,509
	16	7,351
	17	6,104
	18	6,323
	19	7,12
	20	6,911
	21	6,966
	22	6,162
	23	6,942
	24	6,435
	25	6,798
	26	5,804
	27	6,424
	28	6,571
	29	6,43
	30	6,314
	31	6,472
	32	6,845
	33	7,01
	34	6,495
	35	7,004

Realizado por: Orozco W., 2024.

Como se observa en la tabla 3-11 los valores de velocidad de vibración oscilan entre 6 y 7, dando como resultado un promedio de velocidad de vibración RMS = 6.53, el mismo que es menor a la medida anterior tomada.

3.15.2.9 Mediciones de vibración radial a 48°

A continuación, se detallan los pasos a seguir para tomar las mediciones de vibración radial a 48°

Paso 1:

Se procede a colocar el acelerómetro para medir la velocidad de vibración radial a 48° con respecto a la primera medida que se tomó, es decir con respecto a la horizontal, se debe tomar muy en cuenta al momento de situar el sensor en dicha posición que este se encuentre bien sujeto a la caja del módulo de manera que no vaya a moverse de ninguna manera durante la toma de las mediciones.



Ilustración 3-67: Mediciones a 48°

Realizado por: Orozco W., 2024.

Una vez que se situó el acelerómetro en la posición respectiva, se procede a repetir los pasos 2 y 3 que se siguieron cuando se tomaron las mediciones de vibración radial a 0° que consistían encender el motor del módulo y empezar a tomar las mediciones y a recibir los datos tomados por el vibracheck en el programa.

Paso 2:

Luego de haber recibido la información en el programa de las mediciones tomadas por el vibracheck se procede a dar click sobre el icono del espectro de velocidad, en donde se mostrará los datos de velocidad RMS tomados por el vibracheck, el cual se muestra al lado derecho del espectro.

El procedimiento se repite hasta completar las 35 mediciones correspondientes a la posición de 48° con respecto a la horizontal.

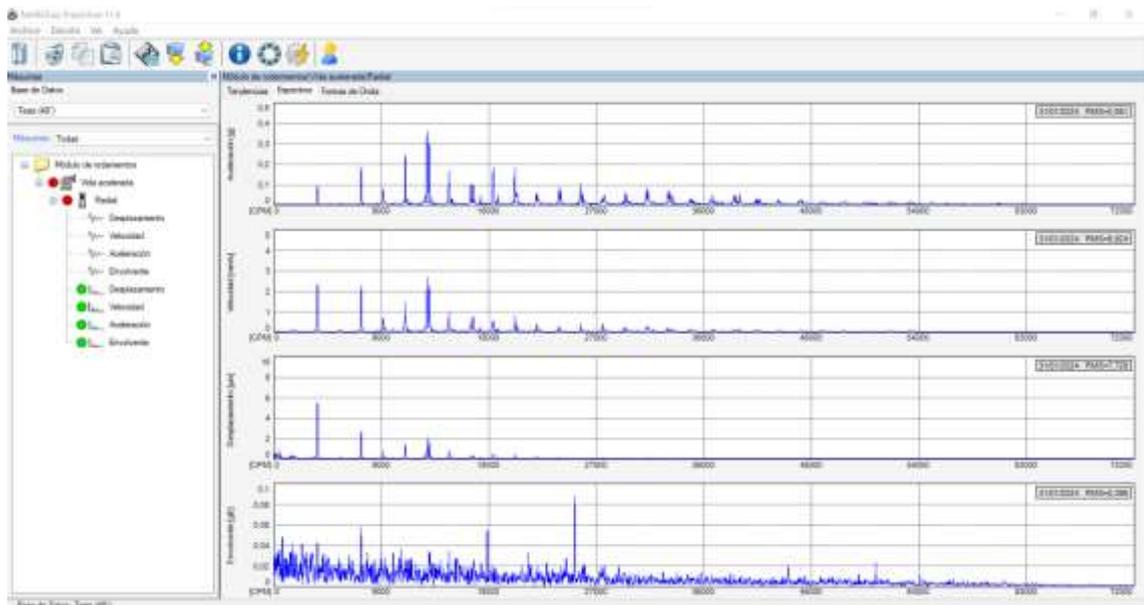


Ilustración 3-68: Espectro de velocidad de vibración tomada a 48°

Realizado por: Orozco W., 2024.

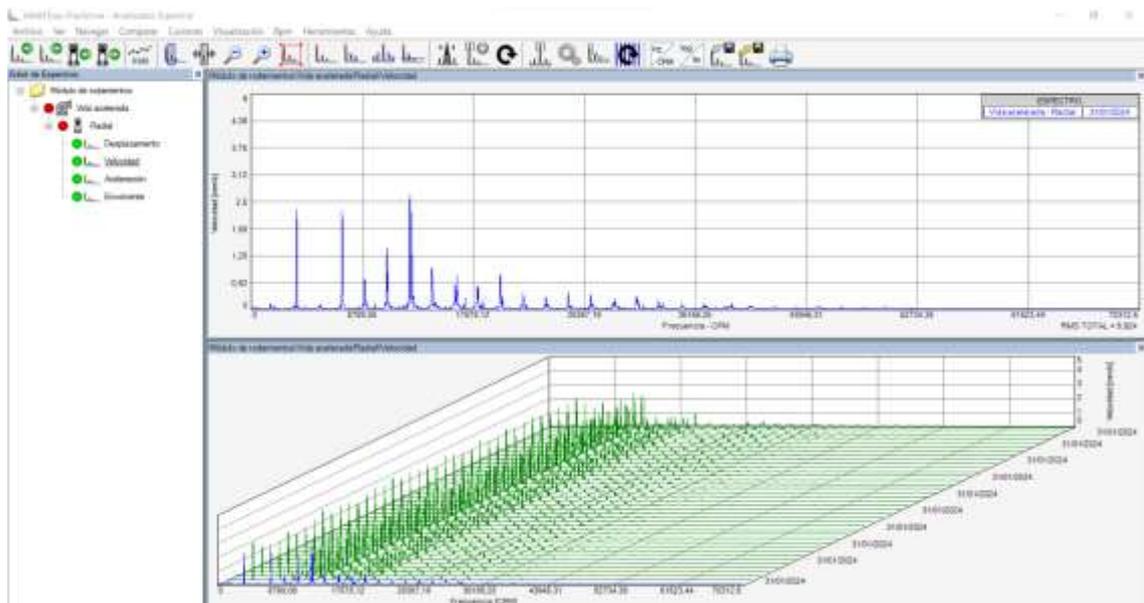


Ilustración 3-69: Mediciones de velocidad de vibración tomadas a 48°

Realizado por: Orozco W., 2024.

En la ilustración 3-69 se pueden observar cada uno de los espectros de las 35 mediciones de velocidad de vibración radial tomadas con el sensor en la posición correspondiente, es decir a 48° con respecto a la horizontal.

A continuación, se muestra una tabla detallada de todas las mediciones tomadas en la posición de 48°:

Tabla 3-12: Datos obtenidos por el vibracheck a 48°

Posición del sensor	# de medición	Velocidad de vibración (RMS)
48°	1	5,628
	2	5,702
	3	5,285
	4	5,628
	5	5,542
	6	5,735
	7	5,559
	8	5,932
	9	5,602
	10	5,364
	11	5,628
	12	5,347
	13	5,461
	14	5,699
	15	5,441
	16	5,613
	17	5,636
	18	5,763
	19	5,5
	20	5,957
	21	5,564
	22	5,413
	23	5,646
	24	5,76
	25	5,547
	26	6,03
	27	5,615
	28	6,072
	29	5,659
	30	5,688
	31	5,727
	32	5,922
	33	5,545
	34	6,014
	35	5,969

Realizado por: Orozco W., 2024.

Como se observa en la tabla 3-12 los valores de velocidad de vibración oscilan entre 5 y 6, dando como resultado un promedio de velocidad de vibración RMS = 5.63, el mismo que es menor a la medida anterior tomada.

3.15.2.10 Mediciones de vibración radial a 54°

A continuación, se detallan los pasos a seguir para tomar las mediciones de vibración radial a 54°

Paso 1:

Se procede a colocar el acelerómetro para medir la velocidad de vibración radial a 54° con respecto a la primera medida que se tomó, es decir con respecto a la horizontal, se debe tomar muy en cuenta al momento de situar el sensor en dicha posición que este se encuentre bien sujeto a la caja del módulo de manera que no vaya a moverse de ninguna manera durante la toma de las mediciones.



Ilustración 3-70: Mediciones a 54°

Realizado por: Orozco W., 2024.

Una vez que se situó el acelerómetro en la posición respectiva, se procede a repetir los pasos 2 y 3 que se siguieron cuando se tomaron las mediciones de vibración radial a 0° que consistían encender el motor del módulo y empezar a tomar las mediciones y a recibir los datos tomados por el vibracheck en el programa.

Paso 2:

Luego de haber recibido la información en el programa de las mediciones tomadas por el vibracheck se procede a dar click sobre el icono del espectro de velocidad, en donde se mostrará los datos de velocidad RMS tomados por el vibracheck, el cual se muestra al lado derecho del espectro.

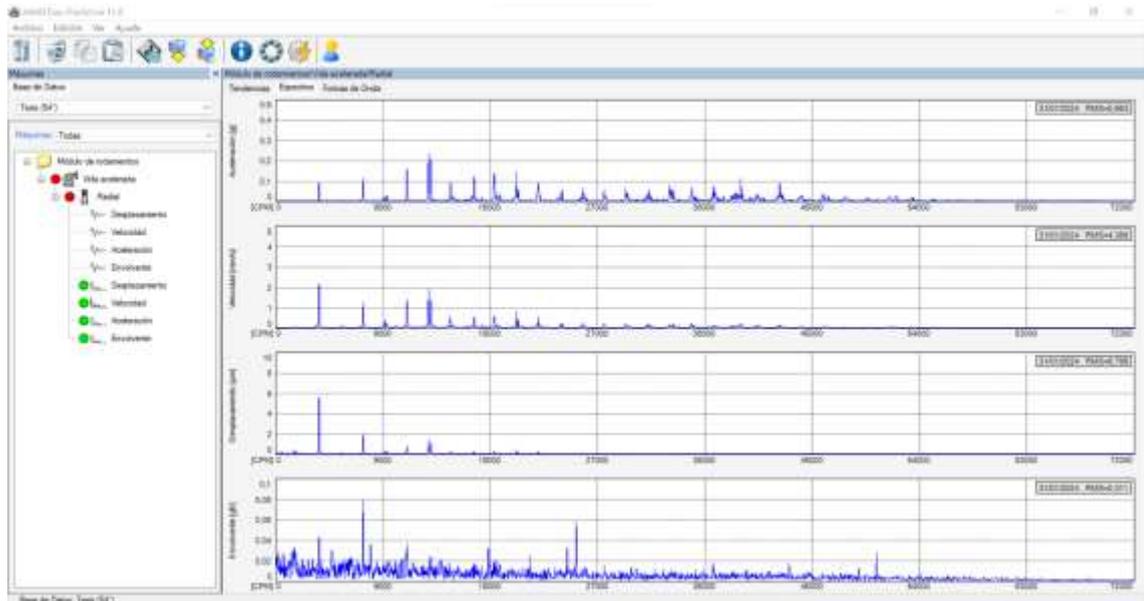


Ilustración 3-71: Espectro de velocidad de vibración tomada a 54°

Realizado por: Orozco W., 2024.

El procedimiento se repite hasta completar las 35 mediciones correspondientes a la posición de 54° con respecto a la horizontal.

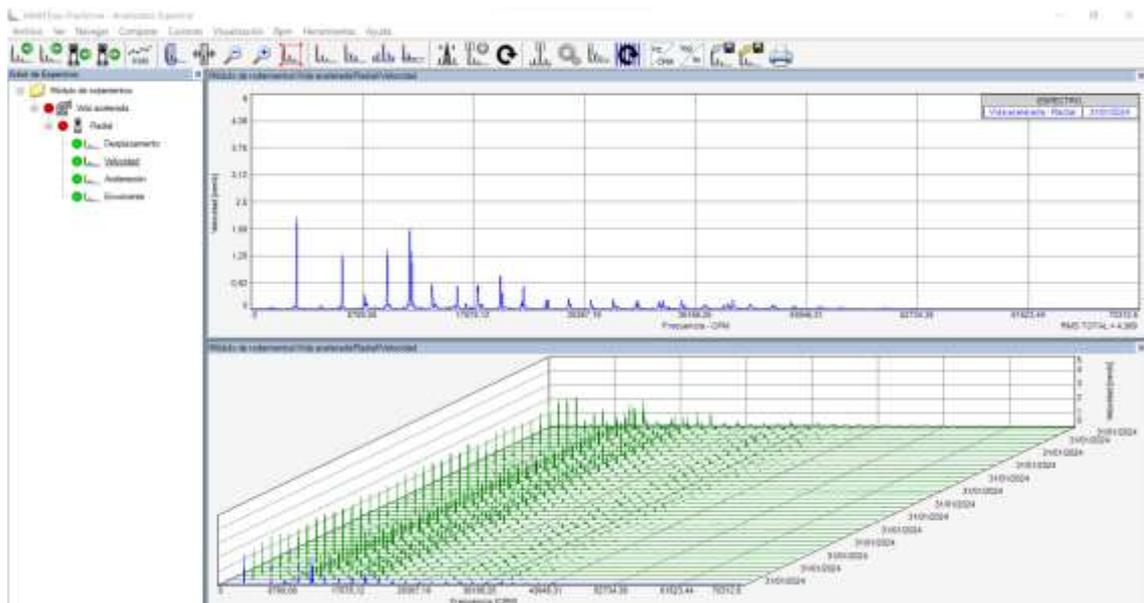


Ilustración 3-72: Mediciones de velocidad de vibración tomadas a 54°

Realizado por: Orozco W., 2024.

En la ilustración 3-72 se pueden observar cada uno de los espectros de las 35 mediciones de velocidad de vibración radial tomadas con el sensor en la posición correspondiente, es decir a 54° con respecto a la horizontal.

A continuación, se muestra una tabla detallada de todas las mediciones tomadas en la posición de 54°:

Tabla 3-13: Datos obtenidos por el vibracheck a 54°

Posición del sensor	# de medición	Velocidad de vibración (RMS)
54°	1	4,547
	2	4,287
	3	4
	4	4,219
	5	4,21
	6	4,136
	7	4,028
	8	4,365
	9	4,007
	10	4,151
	11	4,241
	12	4,175
	13	4,403
	14	4,169
	15	4,34
	16	4,294
	17	4,367
	18	4,125
	19	4,273
	20	4,163
	21	4,027
	22	4,202
	23	4,029
	24	4,389
	25	4,22
	26	4,274
	27	4,497
	28	4,108
	29	4,213
	30	4,121
	31	4,205
	32	4,285
	33	4,322
	34	4,248
	35	4,415

Realizado por: Orozco W., 2024.

Como se observa en la tabla 3-13 los valores de velocidad de vibración oscilan entre 5 y 6, dando como resultado un promedio de velocidad de vibración RMS = 4.23, el mismo que es menor a la medida anterior tomada.

3.15.2.11 Mediciones de vibración radial a 60°

A continuación, se detallan los pasos a seguir para tomar las mediciones de vibración radial a 60°:

Paso 1:

Se procede a colocar el acelerómetro para medir la velocidad de vibración radial a 60° con respecto a la primera medida que se tomó, es decir con respecto a la horizontal, se debe tomar muy en cuenta al momento de situar el sensor en dicha posición que este se encuentre bien sujeto a la caja del módulo de manera que no vaya a moverse de ninguna manera durante la toma de las mediciones.



Ilustración 3-73: Mediciones a 60°

Realizado por: Orozco W., 2024.

Una vez que se situó el acelerómetro en la posición respectiva, se procede a repetir los pasos 2 y 3 que se siguieron cuando se tomaron las mediciones de vibración radial a 0° que consistían encender el motor del módulo y empezar a tomar las mediciones y a recibir los datos tomados por el vibracheck en el programa.

Paso 2:

Luego de haber recibido la información en el programa de las mediciones tomadas por el vibracheck se procede a dar click sobre el icono del espectro de velocidad, en donde se mostrará los datos de velocidad RMS tomados por el vibracheck, el cual se muestra al lado derecho del espectro.

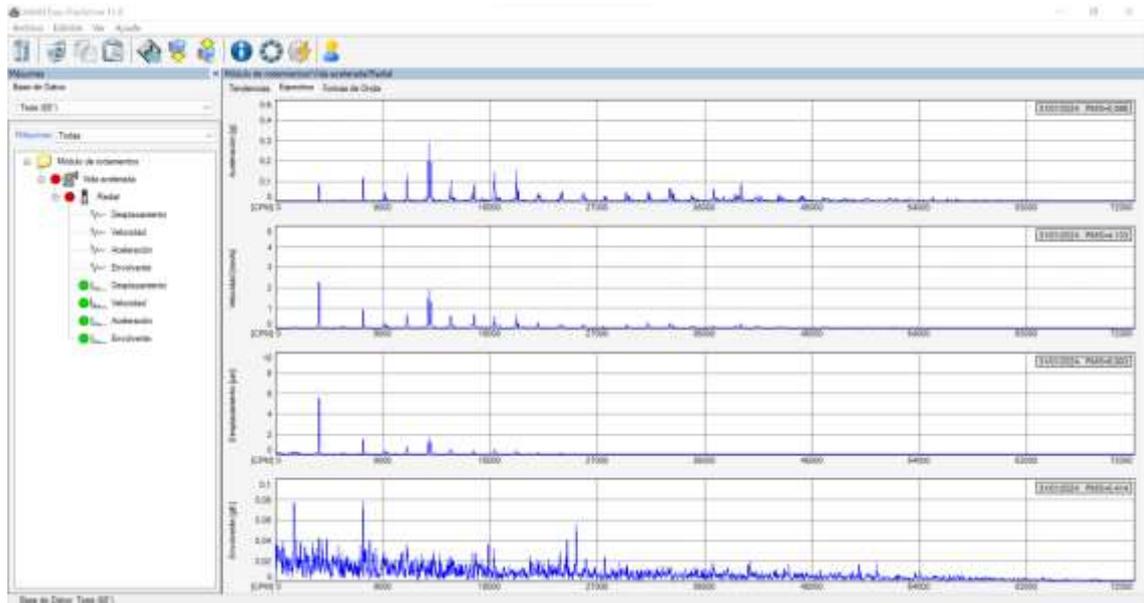


Ilustración 3-74: Espectro de velocidad de vibración tomada a 60°

Realizado por: Orozco W., 2024.

El procedimiento se repite hasta completar las 35 mediciones correspondientes a la posición de 60° con respecto a la horizontal.

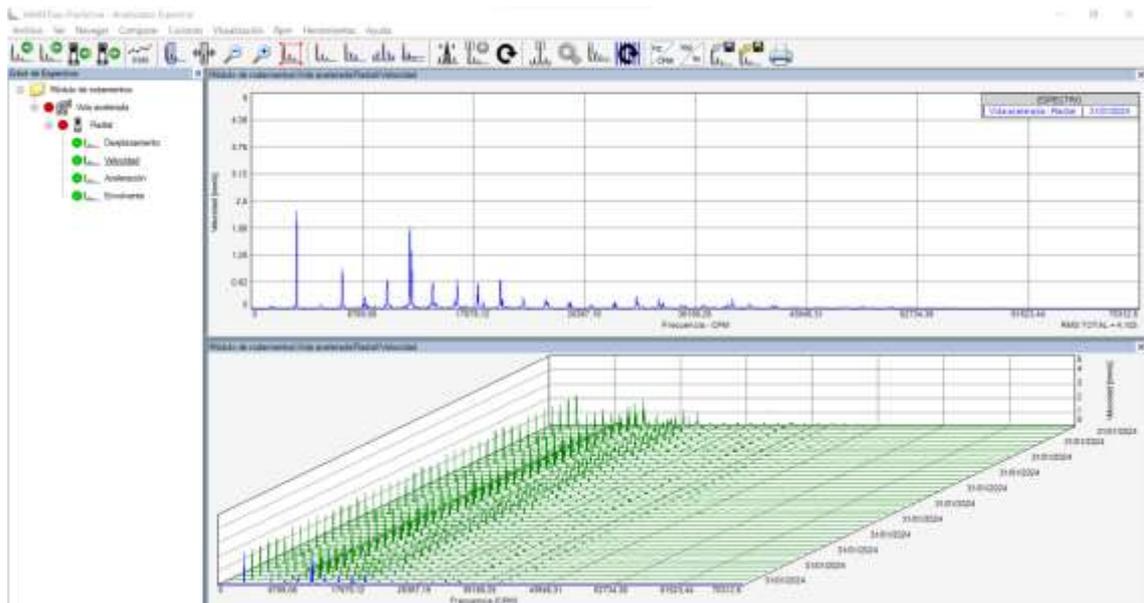


Ilustración 3-75: Mediciones de velocidad de vibración tomadas a 60°

Realizado por: Orozco W., 2024.

En la ilustración 3-75 se pueden observar cada uno de los espectros de las 35 mediciones de velocidad de vibración radial tomadas con el sensor en la posición correspondiente, es decir a 60° con respecto a la horizontal.

A continuación, se muestra una tabla detallada de todas las mediciones tomadas en la posición de 60°:

Tabla 3-14: Datos obtenidos por el vibracheck a 60°

Posición del sensor	# de medición	Velocidad de vibración (RMS)
60°	1	4,183
	2	4,191
	3	4,126
	4	3,958
	5	4,156
	6	4,343
	7	4,35
	8	4,103
	9	4,204
	10	4,074
	11	4,284
	12	4,449
	13	4,354
	14	4,215
	15	3,982
	16	4,058
	17	4,279
	18	4,243
	19	4,261
	20	4,08
	21	4,125
	22	4,17
	23	4,386
	24	4,099
	25	4,427
	26	4,269
	27	3,851
	28	4,421
	29	4,329
	30	4,177
	31	4,484
	32	4,066
	33	4,291
	34	4,193
	35	4,074

Realizado por: Orozco W., 2024.

Como se observa en la tabla 3-14 los valores de velocidad de vibración oscilan entre 5 y 6, dando como resultado un promedio de velocidad de vibración RMS = 4.20, el mismo que es menor a la medida anterior tomada.

3.15.2.12 Mediciones de vibración radial a 66°

A continuación, se detallan los pasos a seguir para tomar las mediciones de vibración radial a 66°

Paso 1:

Se procede a colocar el acelerómetro para medir la velocidad de vibración radial a 66° con respecto a la primera medida que se tomó, es decir con respecto a la horizontal, se debe tomar muy en cuenta al momento de situar el sensor en dicha posición que este se encuentre bien sujeto a la caja del módulo de manera que no vaya a moverse de ninguna manera durante la toma de las mediciones.



Ilustración 3-76: Mediciones a 66°

Realizado por: Orozco W., 2024

Una vez que se situó el acelerómetro en la posición respectiva, se procede a repetir los pasos 2 y 3 que se siguieron cuando se tomaron las mediciones de vibración radial a 0° que consistían encender el motor del módulo y empezar a tomar las mediciones y a recibir los datos tomados por el vibracheck en el programa.

Paso 2:

Luego de haber recibido la información en el programa de las mediciones tomadas por el vibracheck se procede a dar click sobre el icono del espectro de velocidad, en donde se mostrará los datos de velocidad RMS tomados por el vibracheck, el cual se muestra al lado derecho del espectro.

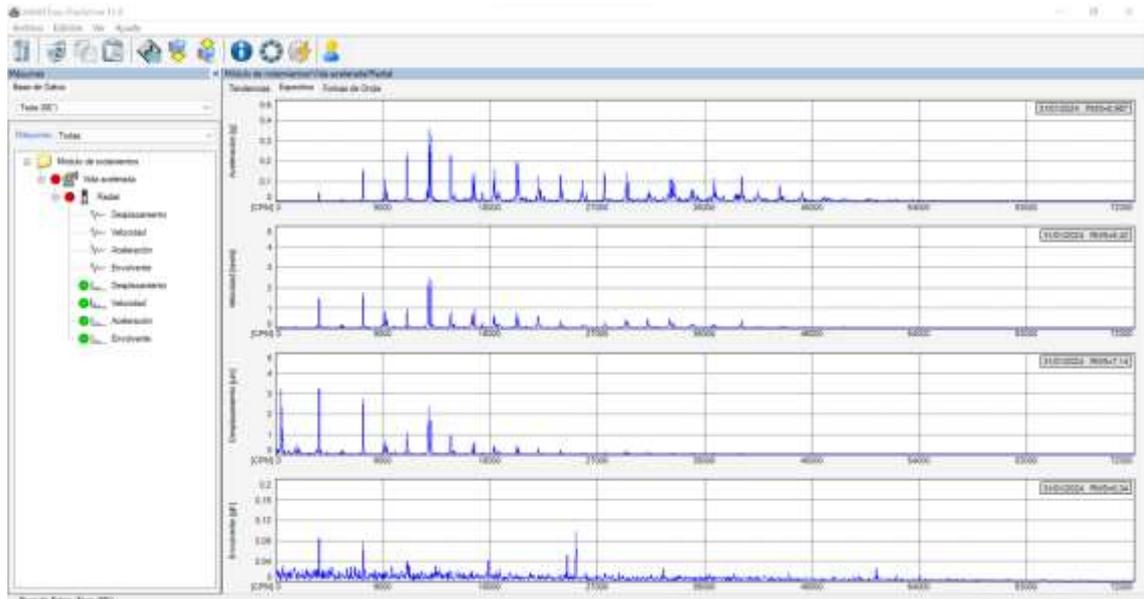


Ilustración 3-77: Espectro de velocidad de vibración tomada a 66°

Realizado por: Orozco W., 2024.

El procedimiento se repite hasta completar las 35 mediciones correspondientes a la posición de 66° con respecto a la horizontal

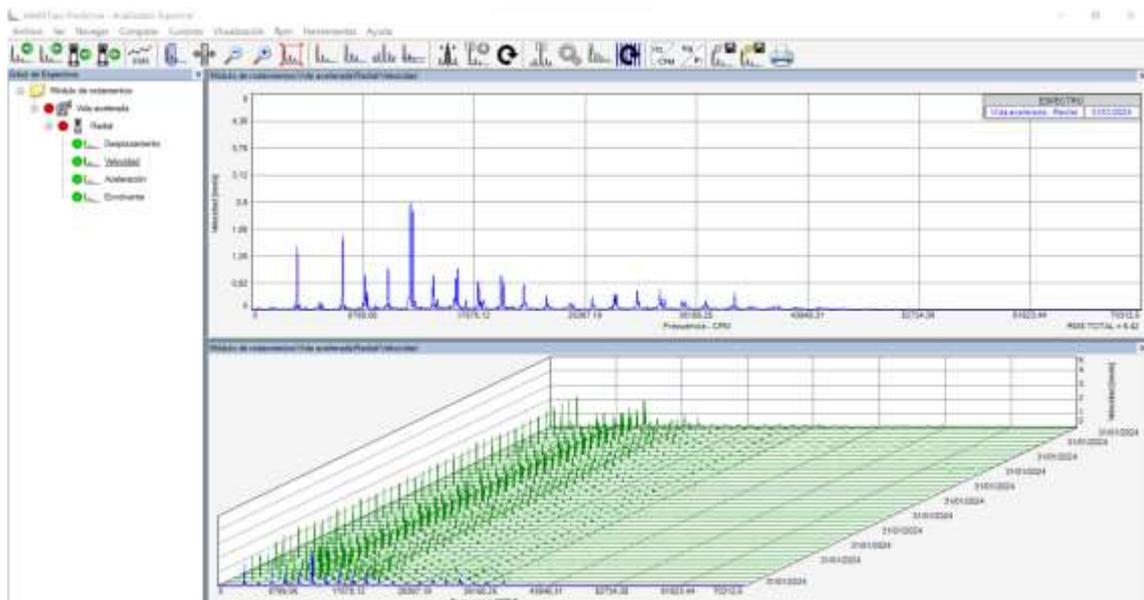


Ilustración 3-78: Mediciones de velocidad de vibración tomadas a 66°

Realizado por: Orozco W., 2024.

En la ilustración 3-78 se pueden observar cada uno de los espectros de las 35 mediciones de velocidad de vibración radial tomadas con el sensor en la posición correspondiente, es decir a 66° con respecto a la horizontal.

A continuación, se muestra una tabla detallada de todas las mediciones tomadas en la posición de 66°

Tabla 3-15: Datos obtenidos por el vibracheck a 66°

Posición del sensor	# de medición	Velocidad de vibración (RMS)
66°	1	3,955
	2	4,036
	3	4,148
	4	3,702
	5	4,026
	6	4,219
	7	3,852
	8	4,089
	9	4,251
	10	4,026
	11	4,068
	12	4,18
	13	3,959
	14	4,118
	15	4,26
	16	4,167
	17	4,044
	18	3,97
	19	3,965
	20	3,994
	21	4,463
	22	4,127
	23	4,212
	24	4,012
	25	4,42
	26	4,187
	27	4,128
	28	4,097
	29	4,178
	30	3,903
	31	3,819
	32	3,968
	33	3,931
	34	4,155
	35	3,978

Realizado por: Orozco W., 2024.

Como se observa en la tabla 3-14 los valores de velocidad de vibración oscilan entre 5 y 6, dando como resultado un promedio de velocidad de vibración RMS = 4.07, el mismo que es menor a la medida anterior tomada.

CAPÍTULO IV

4. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Procesamiento, análisis e interpretación de resultados

Una vez que se han obtenido todas las mediciones en todas las posiciones se procede a analizar los datos, para este propósito se utilizará el software Python para aplicar un método estadístico.

4.1.1 *Importación de librerías a utilizar*

Antes de empezar el análisis de datos es necesario importar las librerías que serán utilizadas durante la programación del código para que no existan errores al momento de compilar.

```
import numpy as np
import pandas as pd
import scipy.stats as stats
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
from tqdm import tqdm
```

4.1.2 *Importación de datos*

Los datos de velocidad de vibración que se obtuvieron en cada posición de la caja de rodamiento con los equipos de medición se importaron a un archivo de Excel denominado “Mediciones de vibraciones” por lo que desde Python se realiza un llamado para que éste lea los datos de dicho archivo con el siguiente código:

```
excel = pd.ExcelFile('Mediciones de vibraciones.xlsx')
print(excel.sheet_names)
```

4.1.3 *Creación de una tabla nueva (Data Frame)*

Para facilitar el análisis de los datos se procede a crear una tabla nueva que se denominará “vibraciones”, para esto utilizamos el siguiente código que leerá los datos del archivo en Excel y después de hacerlo cerrará dicho archivo.

```
vibraciones = excel.parse('Hoja1')
excel.close()
```

4.1.4 Exploración de los primeros y últimos registros

Para mostrar los datos que se importaron del archivo Excel en el código se utiliza las siguientes líneas en donde por la programación realizada se mostrarán los primeros cuatro datos de la tabla y los últimos tres datos de la misma

```
print(vibraciones.head(4))
print(vibraciones.tail(3))
```

	0°	6°	12°	18°	24°	30°	36°	42°	48°	54°	\
0	8.783	9.215	9.025	8.722	8.254	7.824	6.985	6.195	5.095	4.547	
1	8.897	9.465	9.175	8.199	8.257	7.312	6.781	6.622	5.702	4.287	
2	9.468	9.283	8.991	9.159	8.806	8.490	7.481	6.351	5.285	4.000	
3	9.731	9.137	9.220	8.788	8.816	8.136	7.426	6.278	5.165	4.219	

	60°	66°
0	4.183	3.955
1	4.191	4.036
2	4.126	4.148
3	3.958	3.702

	0°	6°	12°	18°	24°	30°	36°	42°	48°	54°
\										
32	9.344	9.818	9.128	8.523	8.735	7.594	7.477	7.010	5.545	4.322
33	9.371	9.571	8.895	9.039	8.987	7.511	7.538	6.495	6.014	4.248
34	9.549	8.840	8.831	9.016	8.080	7.132	6.793	7.004	5.969	4.415

	60°	66°
32	4.291	3.931
33	4.193	4.155
34	4.074	3.978

4.1.5 Exploración informativa de un Data Frame

Una vez que se mostraron los datos se procede a realizar una exploración informativa de estos datos, esto con el fin de saber el número de datos totales, el número de filas y columnas, el tipo de datos, etc.

```
print(vibraciones.info())
```

```
<class 'pandas.core.frame.DataFrame'>  
RangeIndex: 35 entries, 0 to 34  
Data columns (total 12 columns):
```

#	Column	Non-Null Count	Dtype
0	0°	35 non-null	float64
1	6°	35 non-null	float64
2	12°	35 non-null	float64
3	18°	35 non-null	float64
4	24°	35 non-null	float64
5	30°	35 non-null	float64
6	36°	35 non-null	float64
7	42°	35 non-null	float64
8	48°	35 non-null	float64
9	54°	35 non-null	float64
10	60°	35 non-null	float64
11	66°	35 non-null	float64

```
dtypes: float64(12)  
memory usage: 3.4 KB  
None
```

4.1.6 Identificación de datos atípicos

Para un mejor análisis de los datos es importante identificar si en éstos existen valores atípicos que podrían afectar el análisis por esta razón es importante identificarlos para darles un tratamiento, para este propósito se utiliza el código que se muestra en el siguiente código:

```
plt.boxplot(vibraciones, labels=['0°', '6°', '12°',  
'18°', '24°', '30°', '36°', '42°', '48°', '54°', '60°', '66°'],  
            vert=True, patch_artist=True, notch = 'False')  
  
plt.xlabel('Muestras tomadas a diferentes ángulos')  
plt.ylabel('Amplitud global de vibraciones rms [mm/s]')  
plt.grid(True)  
plt.show()
```

En este caso se pudo observar en el diagrama de cajas mostrado por el software que existen datos atípicos específicamente en las mediciones que se realizaron en la posición a 0° y en la posición a 48° como se muestra en la Ilustración 4-4.

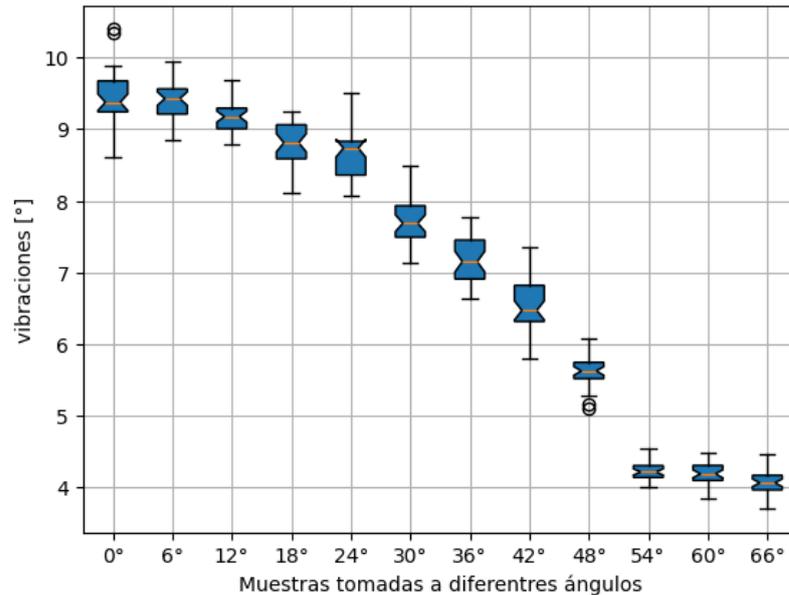


Ilustración 4-1: Identificación de datos atípicos

Realizado por: Orozco W., 2024.

4.1.7 Tratamiento de datos atípicos

Una vez que se identificó que existen datos atípicos se procede a realizar un tratamiento en el mismo código de programación, el método que se utilizó para el tratamiento de los datos consiste en reemplazar los valores atípicos por la mediana para este propósito se utiliza el siguiente código de programación:

```
for columna in vibraciones.columns:
    Q1 = np.percentile(vibraciones[columna], 25)
    Q3 = np.percentile(vibraciones[columna], 75)
    umbral_inf = Q1 - 1.5 * (Q3 - Q1)
    umbral_sup = Q3 + 1.5 * (Q3 - Q1)

    valores_atipicos = (vibraciones[columna] > umbral_sup) |
(vibraciones[columna] < umbral_inf)

    vibraciones[columna][valores_atipicos]=vibraciones[columna].median()
```

4.1.8 Verificación de la existencia de datos atípicos

Una vez que los datos atípicos han sido tratados se vuelve a verificar si todavía existen este tipo de datos, en caso de persistir su existencia se vuelven a tratar, para verificar esto se utiliza el siguiente código:

```
plt.boxplot(vibraciones, labels=['0°', '6°', '12°',
'18°', '24°', '30°', '36°', '42°', '48°', '54°', '60°', '66°'],
            vert=True, patch_artist=True, notch='False')
plt.xlabel('Muestras tomadas a diferentes ángulos')
plt.ylabel('Amplitud global de vibraciones rms [mm/s]')
plt.grid(True)
plt.show()
```

Como se puede observar en la ilustración 4-4, después del tratamiento de datos que se realizó todavía existen datos atípicos específicamente en las medidas a 0° y a 48°, por lo que el procedimiento realizado anteriormente (tratamiento y verificación de datos atípicos) se lo vuelve a repetir.

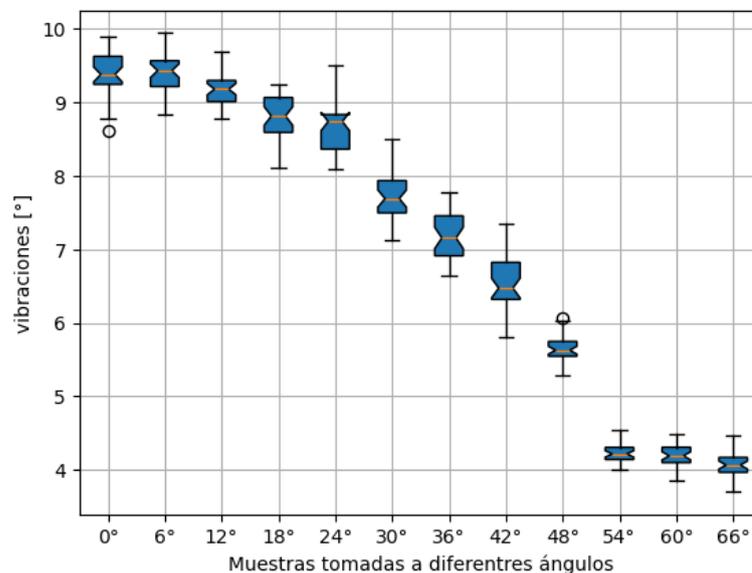


Ilustración 4-2: Verificación de datos atípicos

Realizado por: Orozco W., 2024.

Para repetir el procedimiento anterior se utiliza el mismo código ejecutado anteriormente tanto para el tratamiento como para la verificación como se muestra a continuación:

```
for columna in vibraciones.columns:
    Q1 = np.percentile(vibraciones[columna], 25)
    Q3 = np.percentile(vibraciones[columna], 75)
    umbral_inf = Q1 - 1.5 * (Q3 - Q1)
    umbral_sup = Q3 + 1.5 * (Q3 - Q1)
    valores_atipicos = (vibraciones[columna] > umbral_sup) |
(vibraciones[columna] < umbral_inf)
```

```

vibraciones[columna][valores_atipicos] = vibraciones[columna].median()

plt.boxplot(vibraciones, labels =['0°', '6°', '12°',
'18°', '24°', '30°', '36°', '42°', '48°', '54°', '60°', '66°'],
            vert=True, patch_artist=True, notch = 'False')
plt.xlabel('Muestras tomadas a diferentes ángulos')
plt.ylabel('vibraciones [°]')
plt.grid(True)
plt.show()

```

Una vez repetido el procedimiento se observa en el diagrama de cajas de la ilustración 4-7 que los datos atípicos, aunque no han desaparecido del todo si minoraron y son aceptables para seguir con este estudio.

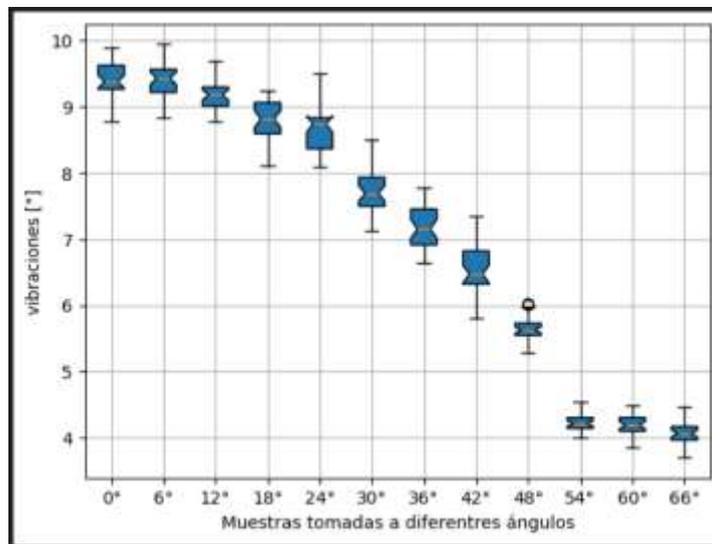


Ilustración 4-3: Tratamiento y verificación de datos atípicos

Realizado por: Orozco W., 2024.

4.1.9 Descripción de los datos

Para un mejor entendimiento del comportamiento de los datos a continuación, se muestra una tabla resumen de todos los datos en esta se observa el número de mediciones, la media, la desviación estándar, así como el valor máximo y mínimo, para mostrar dicha tabla se utiliza el siguiente código:

```

descripcion = vibraciones.describe()
print('Descripción de los datos:\n', descripcion)

```

Descripción de los datos:

	0°	6°	12°	18°	24°	30°
\						
count	35.000000	35.000000	35.000000	35.000000	35.000000	35.000000
mean	9.401771	9.416971	9.171143	8.803429	8.648629	7.741314
std	0.269805	0.293020	0.224919	0.324355	0.322796	0.345469
min	8.783000	8.840000	8.785000	8.115000	8.080000	7.132000
25%	9.259000	9.210500	9.006000	8.587500	8.359500	7.493500
50%	9.375000	9.426000	9.175000	8.810000	8.735000	7.688000
75%	9.621000	9.562000	9.293500	9.061500	8.830000	7.932500
max	9.892000	9.937000	9.680000	9.244000	9.503000	8.490000
	36°	42°	48°	54°	60°	66°
count	35.000000	35.000000	35.000000	35.000000	35.000000	35.000000
mean	7.187057	6.534429	5.649971	4.230143	4.207286	4.074486
std	0.326611	0.345788	0.187239	0.135564	0.147317	0.156346
min	6.635000	5.804000	5.285000	4.000000	3.851000	3.702000
25%	6.910500	6.318500	5.546000	4.143500	4.101000	3.969000
50%	7.153000	6.472000	5.628000	4.219000	4.193000	4.068000
75%	7.453500	6.821500	5.731000	4.308000	4.310000	4.172500
max	7.765000	7.351000	6.030000	4.547000	4.484000	4.463000

4.1.10 Prueba de normalidad

Para determinar si un conjunto de datos se ajusta a una distribución normal, se utiliza el método estadístico de Shapiro-Wilk. Este método se puede aplicar mediante la función `shapiro(x)` que se encuentra dentro de la biblioteca `scipy.stats` en Python (Valverde et al., 2023 pág. 214).

```
p_valor = vibraciones.apply(lambda x: stats.shapiro(x))
print('P valor:\n', p_valor.iloc[1])
```

P valor:

```
0°      0.574725
6°      0.377520
12°     0.434329
18°     0.107044
24°     0.176271
30°     0.452847
36°     0.112959
42°     0.703359
48°     0.182251
54°     0.678509
60°     0.925483
66°     0.766081
```

Name: 1, dtype: float64

Como se puede observar el p valor de todas las muestras son mayores a 0,05 por lo que se puede concluir que los datos se distribuyen normalmente con el 95% de confianza.

4.1.11 *Histograma de frecuencias relativas*

Para empezar a crear un histograma, lo primero que hay que hacer es determinar el número de barras que tendrá, también conocido como “numero de clases”. Este número se calcula a partir de la cantidad de filas que tiene la tabla de frecuencias. (Valverde et al., 2023 pág. 215).

Para calcular el número de clases, se pueden utilizar diferentes métodos como como la Ley de Sturges mostrada a continuación:

```
q = round(1+np.log2(len(vibraciones)))  
  
print('Número de clases (q):',q)
```

Número de clases (q): 6

Una vez que se ha determinado el número de clases en este caso (q)= 6 clases, se procede a construir el histograma, para este propósito se configuran todos los detalles que va a tener el grafico como tamaño, color, nombre de cada gráfico, etc. mediante el código que se muestra

```
fig, axs = plt.subplots(3, 4, figsize=(12, 8)) # 1 fila, 4 columnas  
  
# Elaboración de los histogramas de frecuencia relativas:  
  
for i, ax in enumerate(axs.flat):  
  
    columna = vibraciones.columns[i]  
    ax.hist(vibraciones[columna], density=True, bins=q, color='#3182bd',  
alpha=0.5, ec='black')  
    ax.set_title(f'Vibraciones a {columna}')  
    ax.set_xlabel('Velocidad de vibraciones [mm/s]')  
    ax.set_ylabel('Frecuencia relativa')  
  
plt.tight_layout() # Ajustar el espaciado entre subplots  
plt.show()
```

Una vez que se ha configurado todos los detalles del grafico el software mostrará el grafico del histograma de frecuencias relativas con todos los parámetros configurados en el código como se observa en la ilustración 4-4

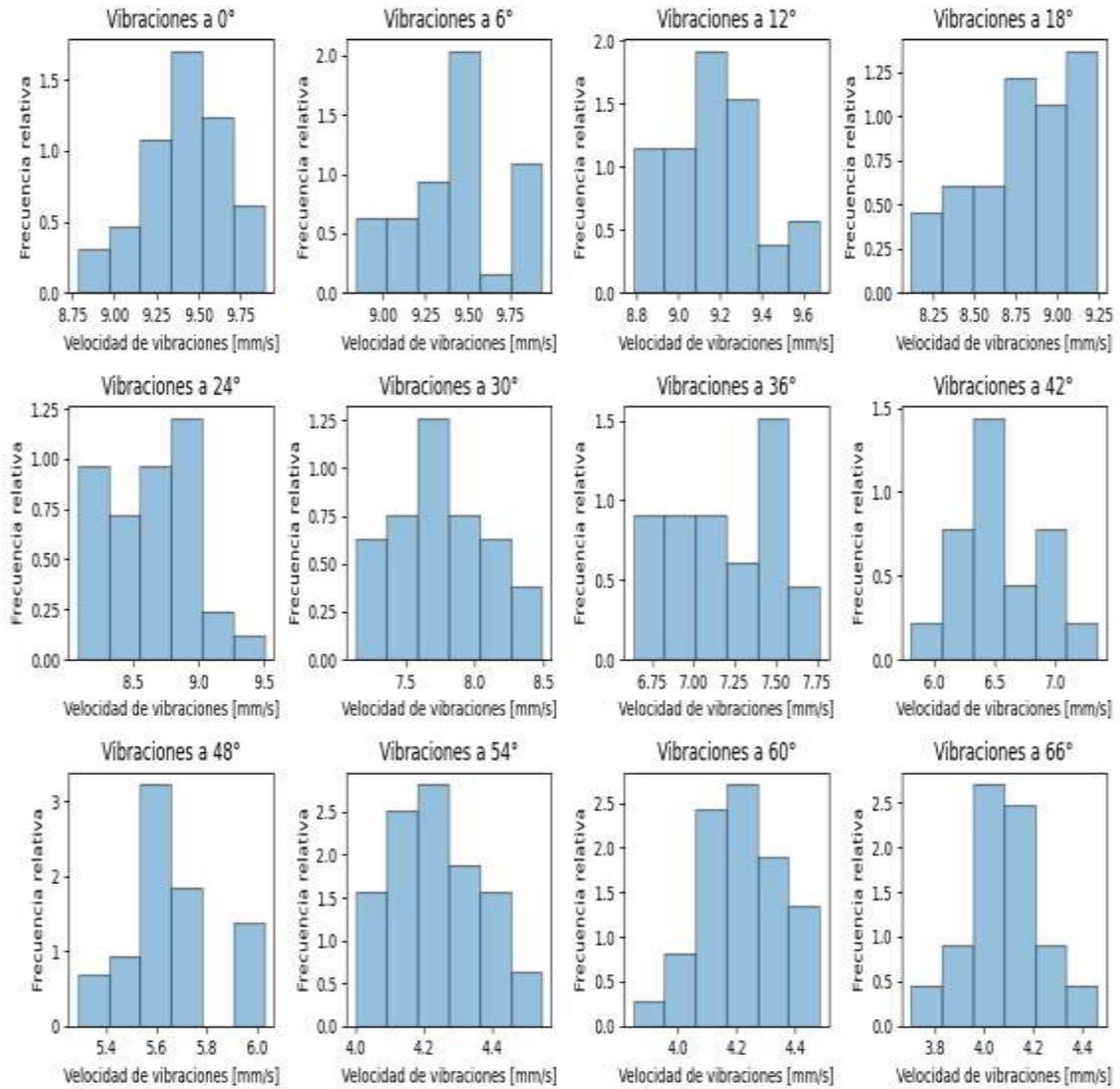


Ilustración 4-4: Histograma de frecuencias relativas

Realizado por: Orozco W., 2024.

4.1.12 Comparación de muestras

Para la comparación de muestras se utiliza la función `stats.ttest.ind` que en Python sirve para realizar una prueba t de Student de dos muestras independientes. Esta prueba se utiliza para determinar si existe una diferencia significativa entre las medias de dos grupos independientes.

4.1.12.1 Comparación de muestras a 0° y a 6°

Para este estudio primero se comparó la media de las muestras de las mediciones a 0° y a 6°, estableciendo la siguiente condición:

H0: $\mu_1 = \mu_2$. La velocidad de vibraciones rms a 0° es igual que a 6° (hipótesis nula)

H1: $\mu_1 \neq \mu_2$. La velocidad de vibraciones rms a 0° es diferente que a 6° (hipótesis alternativa)

Donde:

μ_1 = media de las mediciones de vibraciones tomadas a 0°

μ_2 = media de las mediciones de vibraciones tomadas a 6°

```
stats.ttest_ind(vibraciones['0°'], vibraciones['6°'], alternative='two-sided')
```

```
TtestResult(statistic=-0.22576170684656396, pvalue=0.822063935146887, df=68.0)
```

Luego de la comparación el resultado fue un p valor = 0.822063935146887, el mismo que es mayor a 0,05 por lo que se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alternativa, concluyendo que no existe suficiente evidencia para aseverar que la velocidad de vibraciones rms a 0° es diferente que a 6°, con una confianza del 95%

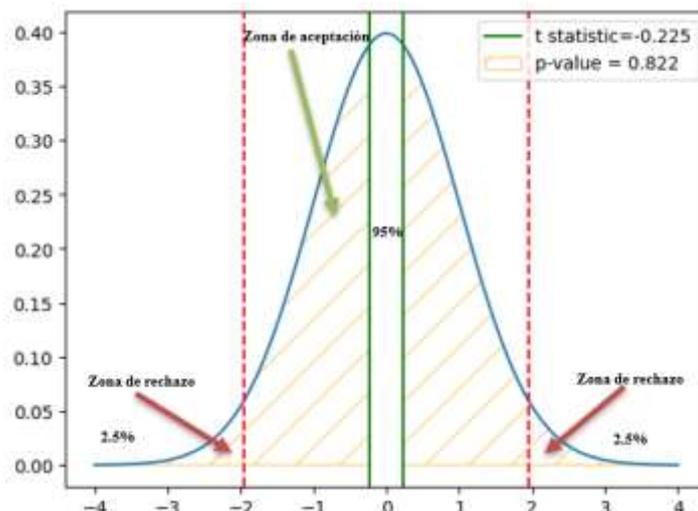


Ilustración 4-5: Comparación de muestras a 0 y 6°

Realizado por: Orozco W., 2024.

4.1.12.2 Comparación de muestras a 0° y a 12°

Luego de comparar las muestras de medición de vibración a 0° y a 6° se procede a comparar las muestras entre las mediciones de 0° y 12° estableciendo la siguiente condición:

H0: $\mu_1 = \mu_2$. La velocidad de vibraciones rms a 0° es igual que a 12° (hipótesis nula)

H1: $\mu_1 \neq \mu_2$. La velocidad de vibraciones rms a 0° es diferente que a 12° (hipótesis alternativa)

Donde:

μ_1 = media de las mediciones de vibraciones tomadas a 0°

μ_2 = media de las mediciones de vibraciones tomadas a 12°

```
stats.ttest_ind(vibraciones['0°'], vibraciones['12°'], alternative='two-sided')
```

```
TtestResult(statistic=3.8843578914407346, pvalue=0.00023493841523424179, df=68.0)
```

Luego de la comparación se obtuvo un resultado de un p valor = 0.00023493841523424179 el mismo que es menor a 0,05 por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, concluyendo que existe suficiente evidencia para aseverar que la velocidad de vibraciones rms a 0° es diferente que a 12°, con un 95% de confianza.

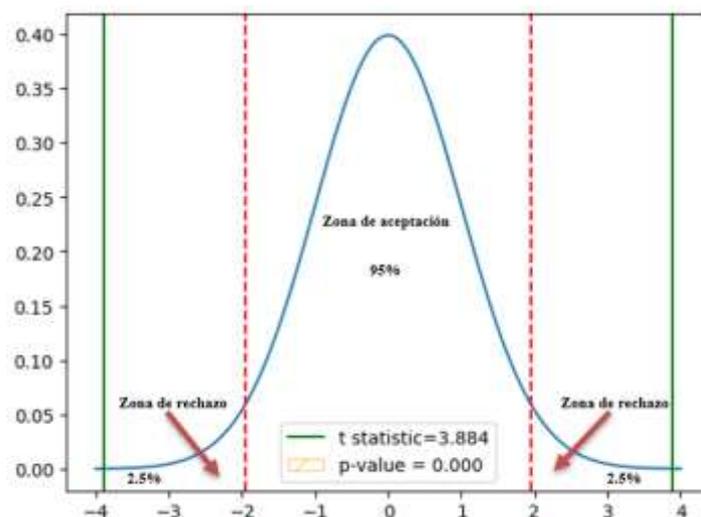


Ilustración 4-6: Comparación de muestras a 0 y 12° dos colas

Realizado por: Orozco W., 2024.

Como se pudo observar en la comparación realizada anteriormente entre la media de los valores tomados de velocidad de vibración a 0° y la media de los valores tomados de velocidad de vibración a 12° que estos difieren o no son iguales, por lo que ahora se pretende comprender de qué manera difieren exactamente, aplicando la siguiente condición:

H0: $\mu_2 > \mu_1$. La velocidad de vibraciones rms a 12° es mayor que a 0° (hipótesis nula)

H1: $\mu_2 < \mu_1$. La velocidad de vibraciones rms a 12° es menor que a 0° (hipótesis alternativa)

Donde:

μ_1 = media de las mediciones de vibraciones tomadas a 0°

μ_2 = media de las mediciones de vibraciones tomadas a 12°

```
stats.ttest_ind(vibraciones['12°'], vibraciones['0°'],  
alternative='less')
```

```
TtestResult(statistic=-3.8843578914407346, pvalue=0.00011746920761712089,  
df=68.0)
```

Como se obtuvo un p valor = 0.00011746920761712089 el cual es menor a 0.05 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, concluyendo que existe suficiente evidencia para aseverar que la velocidad de vibración rms a 12° es menor que a 0°, con un 95% de confianza.

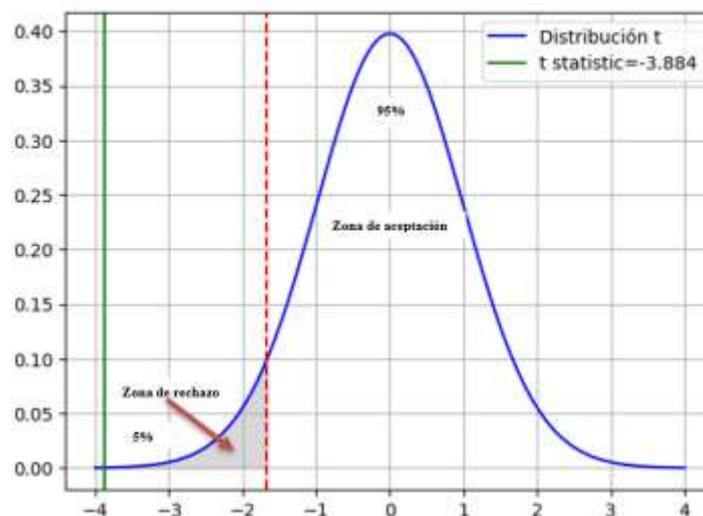


Ilustración 4-7: Comparación de muestras a 0 y 12° cola izquierda

Realizado por: Orozco W., 2024.

4.1.12.3 Comparación de muestras a 0° y a 18°

Luego de comparar las muestras de medición de vibración a 0° y a 12° se procede a comparar las muestras entre las mediciones de 0° y 18° estableciendo la siguiente condición:

H0: $\mu_1 = \mu_2$. La velocidad de vibraciones rms a 0° es igual que a 18° (hipótesis nula)

H1: $\mu_1 \neq \mu_2$. La velocidad de vibraciones rms a 0° es diferente que a 18° (hipótesis alternativa)

Donde:

μ_1 = media de las mediciones de vibraciones tomadas a 0°

μ_2 = media de las mediciones de vibraciones tomadas a 18°

```
stats.ttest_ind(vibraciones['0°'], vibraciones['18°'], alternative='two-sided')
```

```
TtestResult(statistic=-8.390209663680828, pvalue=4.287615749477522e-12, df=68.0)
```

Luego de la comparación se obtuvo un resultado de un p valor = 4.287615749477522e-12 el mismo que es menor a 0,05 por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, concluyendo que existe suficiente evidencia para aseverar que la velocidad de vibraciones rms a 0° es diferente que a 18°, con un 95% de confianza.

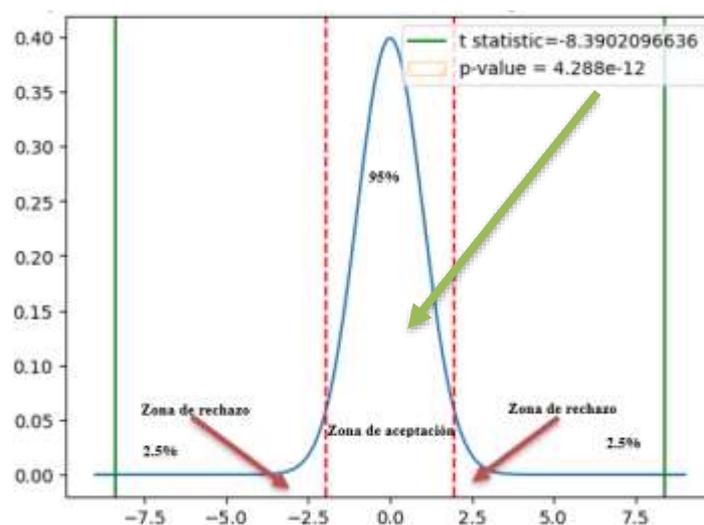


Ilustración 4-8: Comparación de muestras a 0 y 18° dos colas

Realizado por: Orozco W., 2024.

Como se pudo observar en la comparación realizada anteriormente entre la media de los valores tomados de velocidad de vibración a 0° y la media de los valores tomados de velocidad de vibración a 18° que estos difieren o no son iguales, por lo que ahora se pretende comprender de qué manera difieren exactamente, aplicando la siguiente condición:

H0: $\mu_2 > \mu_1$. La velocidad de vibraciones rms a 18° es mayor que a 0° (hipótesis nula)

H1: $\mu_2 < \mu_1$. La velocidad de vibraciones rms a 18° es menor que a 0° (hipótesis alternativa)

Donde:

μ_1 = media de las mediciones de vibraciones tomadas a 0°

μ_2 = media de las mediciones de vibraciones tomadas a 18°

```
stats.ttest_ind(vibraciones['12°'], vibraciones['0°'],  
alternative='less')
```

```
TtestResult(statistic=-8.390209663680828, pvalue=2.143807874738761e-12,  
df=68.0)
```

Como se obtuvo un p valor = 2.143807874738761e-12 el cual es menor a 0.05 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, concluyendo que existe suficiente evidencia para aseverar que la velocidad de vibración rms a 12° es menor que a 0°, con un 95% de confianza.

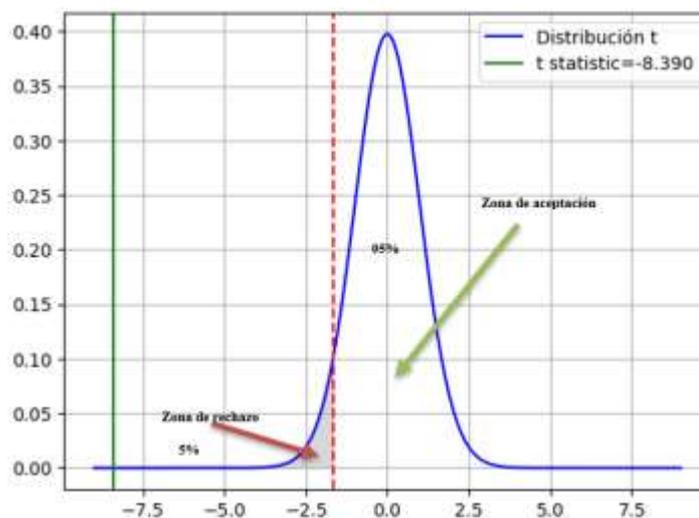


Ilustración 4-9: Comparación de muestras a 0 y 18° cola izquierda

Realizado por: Orozco W., 2024.

4.1.12.4 Comparación de muestras a 0° y a 24°

Luego de comparar las muestras de medición de vibración a 0° y a 18° se procede a comparar las muestras entre las mediciones de 0° y 24° estableciendo la siguiente condición:

H0: $\mu_1 = \mu_2$. La velocidad de vibraciones rms a 0° es igual que a 24° (hipótesis nula)

H1: $\mu_1 \neq \mu_2$. La velocidad de vibraciones rms a 0° es diferente que a 24° (hipótesis alternativa)

Donde:

μ_1 = media de las mediciones de vibraciones tomadas a 0°

μ_2 = media de las mediciones de vibraciones tomadas a 24°

```
stats.ttest_ind(vibraciones['0°'], vibraciones['24°'], alternative='two-sided')
```

```
TtestResult(statistic=10.590946384818453, pvalue=4.960877712277984e-16, df=68.0)
```

Luego de la comparación se obtuvo un resultado de un p valor = 4.960877712277984e-16 el mismo que es menor a 0,05 por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, concluyendo que existe suficiente evidencia para aseverar que la velocidad de vibraciones rms a 0° es diferente que a 18°, con un 95% de confianza.

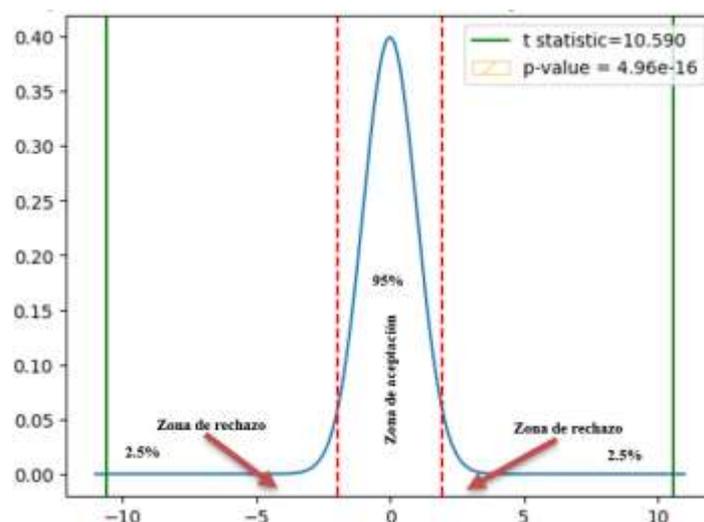


Ilustración 4-10: Comparación de muestras a 0 y 18° dos colas

Realizado por: Orozco W., 2024.

Como se pudo observar en la comparación realizada anteriormente entre la media de los valores tomados de velocidad de vibración a 0° y la media de los valores tomados de velocidad de vibración a 24° que estos difieren o no son iguales, por lo que ahora se pretende comprender de qué manera difieren exactamente, aplicando la siguiente condición:

H0: $\mu_2 > \mu_1$. La velocidad de vibraciones rms a 24° es mayor que a 0° (hipótesis nula)

H1: $\mu_2 < \mu_1$. La velocidad de vibraciones rms a 24° es menor que a 0° (hipótesis alternativa)

Donde:

μ_1 = media de las mediciones de vibraciones tomadas a 0°

μ_2 = media de las mediciones de vibraciones tomadas a 24°

```
stats.ttest_ind(vibraciones['12°'], vibraciones['0°'],  
alternative='less')
```

```
TtestResult(statistic=-10.590946384818453, pvalue=2.480438856138992e-16,  
df=68.0)
```

Como se obtuvo un p valor = 2.480438856138992e-16 el cual es menor a 0.05 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, concluyendo que existe suficiente evidencia para aseverar que la velocidad de vibración rms a 24° es menor que a 0°, con un 95% de confianza.

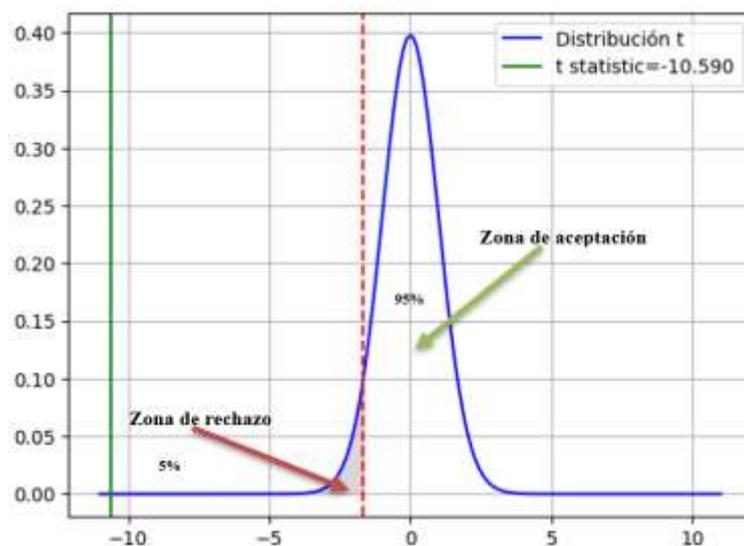


Ilustración 4-11: Comparación de muestras a 0 y 24° cola izquierda

Realizado por: Orozco W., 2024.

4.1.12.5 Comparación de muestras a 0° y a 30°

Luego de comparar las muestras de medición de vibración a 0° y a 24° se procede a comparar las muestras entre las mediciones de 0° y 30° estableciendo la siguiente condición:

H0: $\mu_1 = \mu_2$. La velocidad de vibraciones rms a 0° es igual que a 30° (hipótesis nula)

H1: $\mu_1 \neq \mu_2$. La velocidad de vibraciones rms a 0° es diferente que a 30° (hipótesis alternativa)

Donde:

μ_1 = media de las mediciones de vibraciones tomadas a 0°

μ_2 = media de las mediciones de vibraciones tomadas a 30°

```
stats.ttest_ind(vibraciones['0°'], vibraciones['30°'], alternative='two-sided')
```

```
TtestResult(statistic=10.590946384818453, pvalue=4.960877712277984e-16, df=68.0)
```

Luego de la comparación se obtuvo un resultado de un p valor = 4.960877712277984e-16 el mismo que es menor a 0,05 por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, concluyendo que existe suficiente evidencia para aseverar que la velocidad de vibraciones rms a 0° es diferente que a 18°, con un 95% de confianza.

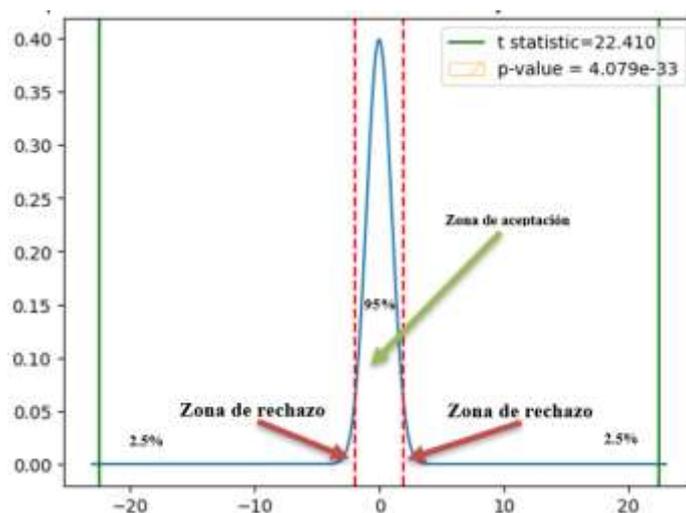


Ilustración 4-12: Comparación de muestras a 0 y 30° dos colas

Realizado por: Orozco W., 2024.

Como se pudo observar en la comparación realizada anteriormente entre la media de los valores tomados de velocidad de vibración a 0° y la media de los valores tomados de velocidad de vibración a 24° que estos difieren o no son iguales, por lo que ahora se pretende comprender de qué manera difieren exactamente, aplicando la siguiente condición:

H0: $\mu_2 > \mu_1$. La velocidad de vibraciones rms a 30° es mayor que a 0° (hipótesis nula)

H1: $\mu_2 < \mu_1$. La velocidad de vibraciones rms a 30° es menor que a 0° (hipótesis alternativa)

Donde:

μ_1 = media de las mediciones de vibraciones tomadas a 0°

μ_2 = media de las mediciones de vibraciones tomadas a 30°

```
stats.ttest_ind(vibraciones['30°'], vibraciones['0°'],  
alternative='less')
```

```
TtestResult(statistic=-22.410338767669842, pvalue=2.0397256030055174e-33,  
df=68.0)
```

Como se obtuvo un p valor = 2.0397256030055174e-33 el cual es menor a 0.05 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, concluyendo que existe suficiente evidencia para aseverar que la velocidad de vibración rms a 30° es menor que a 0°, con un 95% de confianza.

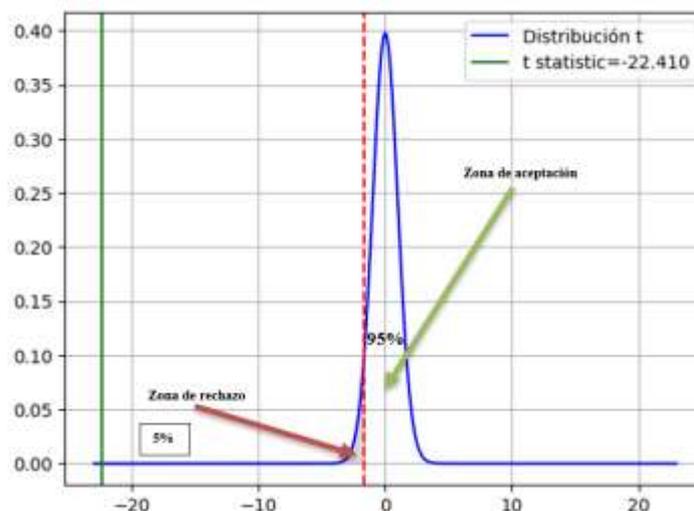


Ilustración 4-13: Comparación de muestras a 0 y 30° cola izquierda

Realizado por: Orozco W., 2024.

4.1.12.6 Comparación de muestras a 0° y a 36°

Luego de comparar las muestras de medición de vibración a 0° y a 30° se procede a comparar las muestras entre las mediciones de 0° y 36° estableciendo la siguiente condición:

H0: $\mu_1 = \mu_2$. La velocidad de vibraciones rms a 0° es igual que a 36° (hipótesis nula)

H1: $\mu_1 \neq \mu_2$. La velocidad de vibraciones rms a 0° es diferente que a 36° (hipótesis alternativa)

Donde:

μ_1 = media de las mediciones de vibraciones tomadas a 0°

μ_2 = media de las mediciones de vibraciones tomadas a 36°

```
stats.ttest_ind(vibraciones['0°'], vibraciones['36°'], alternative='two-sided')
```

```
TtestResult(statistic=30.928327561081, pvalue=8.822106732897813e-42, df=68.0)
```

Luego de la comparación se obtuvo un resultado de un p valor = 8.822106732897813e-42 el mismo que es menor a 0,05 por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, concluyendo que existe suficiente evidencia para aseverar que la velocidad de vibraciones rms a 0° es diferente que a 36°, con un 95% de confianza.

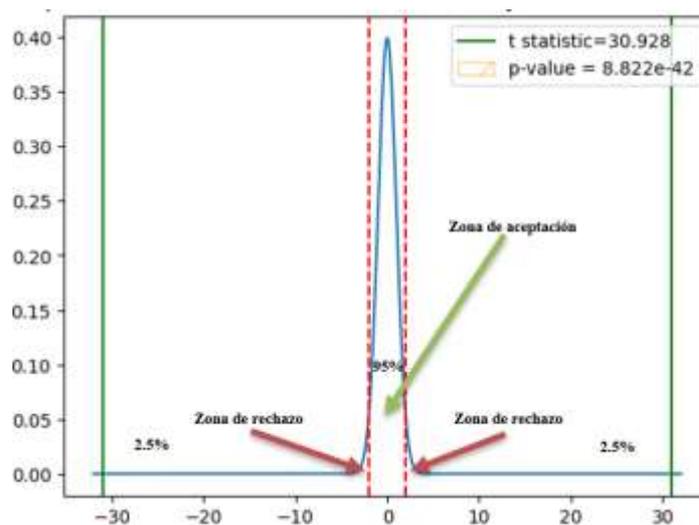


Ilustración 4-14: Comparación de muestras a 0 y 36° dos colas

Realizado por: Orozco W., 2024.

Como se pudo observar en la comparación realizada anteriormente entre la media de los valores tomados de velocidad de vibración a 0° y la media de los valores tomados de velocidad de vibración a 36° que estos difieren o no son iguales, por lo que ahora se pretende comprender de qué manera difieren exactamente, aplicando la siguiente condición:

H0: $\mu_2 > \mu_1$. La velocidad de vibraciones rms a 36° es mayor que a 0° (hipótesis nula)

H1: $\mu_2 < \mu_1$. La velocidad de vibraciones rms a 36° es menor que a 0° (hipótesis alternativa)

Donde:

μ_1 = media de las mediciones de vibraciones tomadas a 0°

μ_2 = media de las mediciones de vibraciones tomadas a 36°

```
stats.ttest_ind(vibraciones['36°'], vibraciones['0°'],  
alternative='less')
```

```
TtestResult(statistic=-30.928327561081, pvalue=4.4110533664489066e-42,  
df=68.0)
```

Como se obtuvo un p valor = 4.4110533664489066e-42 el cual es menor a 0.05 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, concluyendo que existe suficiente evidencia para aseverar que la velocidad de vibración rms a 36° es menor que a 0°, con un 95% de confianza.

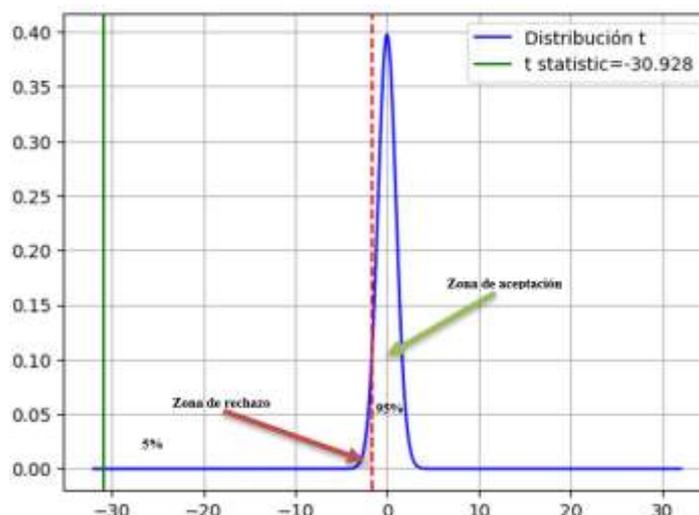


Ilustración 4-15: Comparación de muestras a 0 y 36° cola izquierda

Realizado por: Orozco W., 2024.

4.1.12.7 Comparación de muestras a 0° y a 42°

Luego de comparar las muestras de medición de vibración a 0° y a 36° se procede a comparar las muestras entre las mediciones de 0° y 42° estableciendo la siguiente condición:

H0: $\mu_1 = \mu_2$. La velocidad de vibraciones rms a 0° es igual que a 42° (hipótesis nula)

H1: $\mu_1 \neq \mu_2$. La velocidad de vibraciones rms a 0° es diferente que a 42° (hipótesis alternativa)

Donde:

μ_1 = media de las mediciones de vibraciones tomadas a 0°

μ_2 = media de las mediciones de vibraciones tomadas a 42°

```
stats.ttest_ind(vibraciones['0°'], vibraciones['42°'], alternative='two-sided')
```

```
TtestResult(statistic=38.676923648820484, pvalue=4.9615406067346583e-48, df=68.0)
```

Luego de la comparación se obtuvo un resultado de un p valor = 4.9615406067346583e-48 el mismo que es menor a 0,05 por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, concluyendo que existe suficiente evidencia para aseverar que la velocidad de vibraciones rms a 0° es diferente que a 42°, con un 95% de confianza.

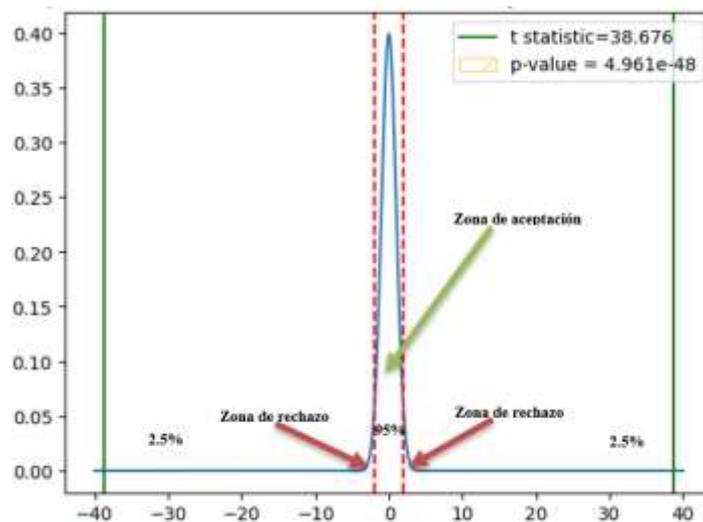


Ilustración 4-16: Comparación de muestras a 0 y 42° dos colas

Realizado por: Orozco W., 2024.

Como se pudo observar en la comparación realizada anteriormente entre la media de los valores tomados de velocidad de vibración a 0° y la media de los valores tomados de velocidad de vibración a 42° que estos difieren o no son iguales, por lo que ahora se pretende comprender de qué manera difieren exactamente, aplicando la siguiente condición:

H0: $\mu_2 > \mu_1$. La velocidad de vibraciones rms a 42° es mayor que a 0° (hipótesis nula)

H1: $\mu_2 < \mu_1$. La velocidad de vibraciones rms a 42° es menor que a 0° (hipótesis alternativa)

Donde:

μ_1 = media de las mediciones de vibraciones tomadas a 0°

μ_2 = media de las mediciones de vibraciones tomadas a 42°

```
stats.ttest_ind(vibraciones['42°'], vibraciones['0°'],  
alternative='less')
```

```
TtestResult(statistic=-38.676923648820484, pvalue=2.4807703033673292e-48,  
df=68.0)
```

Como se obtuvo un p valor = 4.4110533664489066e-42 el cual es menor a 0.05 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, concluyendo que existe suficiente evidencia para aseverar que la velocidad de vibración rms a 42° es menor que a 0°, con un 95% de confianza.

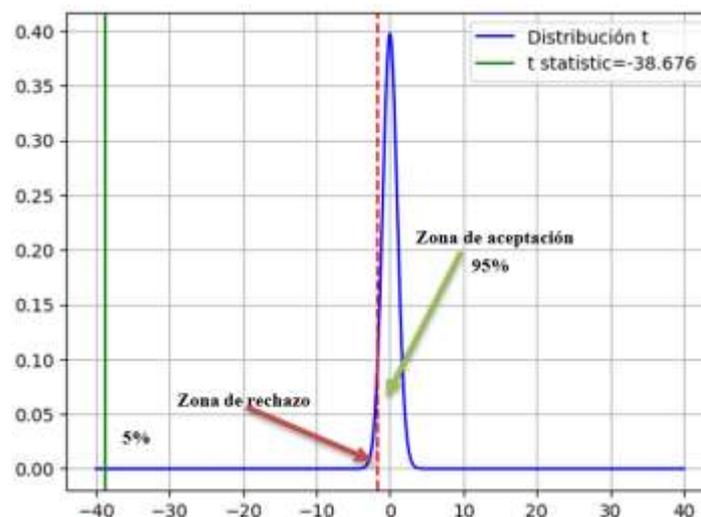


Ilustración 4-17: Comparación de muestras a 0 y 42° cola izquierda

Realizado por: Orozco W., 2024.

4.1.12.8 Comparación de muestras a 0° y a 48°

Luego de comparar las muestras de medición de vibración a 0° y a 42° se procede a comparar las muestras entre las mediciones de 0° y 48° estableciendo la siguiente condición:

H0: $\mu_1 = \mu_2$. La velocidad de vibraciones rms a 0° es igual que a 48° (hipótesis nula)

H1: $\mu_1 \neq \mu_2$. La velocidad de vibraciones rms a 0° es diferente que a 48° (hipótesis alternativa)

Donde:

μ_1 = media de las mediciones de vibraciones tomadas a 0°

μ_2 = media de las mediciones de vibraciones tomadas a 48°

```
stats.ttest_ind(vibraciones['0°'], vibraciones['48°'], alternative='two-sided')
```

```
TtestResult(statistic=67.58604683565171, pvalue=4.405894898611143e-64, df=68.0)
```

Luego de la comparación se obtuvo un resultado de un p valor = 4.405894898611143e-64 el mismo que es menor a 0,05 por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, concluyendo que existe suficiente evidencia para aseverar que la velocidad de vibraciones rms a 0° es diferente que a 48°, con un 95% de confianza.

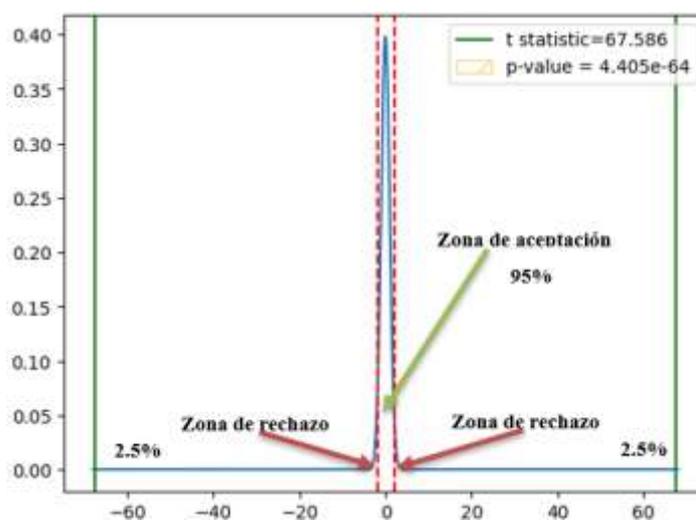


Ilustración 4-18: Comparación de muestras a 0 y 48° dos colas

Realizado por: Orozco W., 2024.

Como se pudo observar en la comparación realizada anteriormente entre la media de los valores tomados de velocidad de vibración a 0° y la media de los valores tomados de velocidad de vibración a 48° que estos difieren o no son iguales, por lo que ahora se pretende comprender de qué manera difieren exactamente, aplicando la siguiente condición:

H0: $\mu_2 > \mu_1$. La velocidad de vibraciones rms a 48° es mayor que a 0° (hipótesis nula)

H1: $\mu_2 < \mu_1$. La velocidad de vibraciones rms a 48° es menor que a 0° (hipótesis alternativa)

Donde:

μ_1 = media de las mediciones de vibraciones tomadas a 0°

μ_2 = media de las mediciones de vibraciones tomadas a 48°

```
stats.ttest_ind(vibraciones['48°'], vibraciones['0°'],  
alternative='less')
```

```
TtestResult(statistic=-67.58604683565171, pvalue=2.2029474493055715e-64,  
df=68.0)
```

Como se obtuvo un p valor = 2.2029474493055715e-64 el cual es menor a 0.05 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, concluyendo que existe suficiente evidencia para aseverar que la velocidad de vibración rms a 42° es menor que a 0°, con un 95% de confianza.

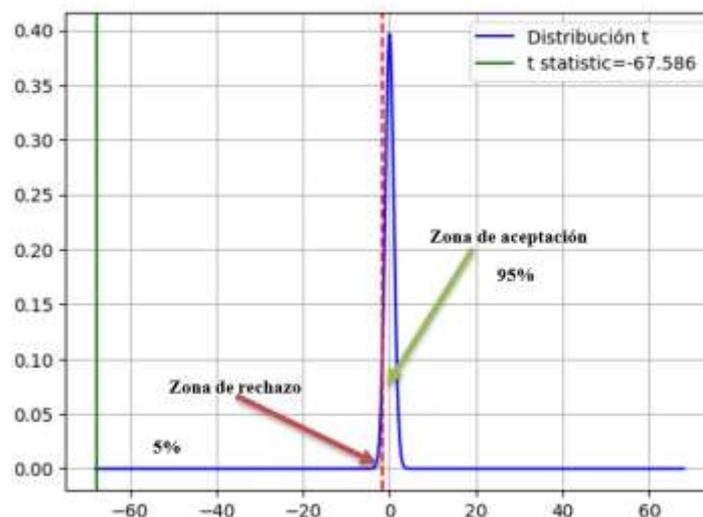


Ilustración 4-19: Comparación de muestras a 0 y 48° cola izquierda

Realizado por: Orozco W., 2024.

4.1.12.9 Comparación de muestras a 0° y a 54°

Luego de comparar las muestras de medición de vibración a 0° y a 48° se procede a comparar las muestras entre las mediciones de 0° y 54° estableciendo la siguiente condición:

H0: $\mu_1 = \mu_2$. La velocidad de vibraciones rms a 0° es igual que a 54° (hipótesis nula)

H1: $\mu_1 \neq \mu_2$. La velocidad de vibraciones rms a 0° es diferente que a 54° (hipótesis alternativa)

Donde:

μ_1 = media de las mediciones de vibraciones tomadas a 0°

μ_2 = media de las mediciones de vibraciones tomadas a 54°

```
stats.ttest_ind(vibraciones['0°'], vibraciones['54°'], alternative='two-sided')
```

```
TtestResult(statistic=101.32812698480248, pvalue=6.363144304061882e-76, df=68.0)
```

Luego de la comparación se obtuvo un resultado de un p valor = 6.363144304061882e-76 el mismo que es menor a 0,05 por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, concluyendo que existe suficiente evidencia para aseverar que la velocidad de vibraciones rms a 0° es diferente que a 54°, con un 95% de confianza.

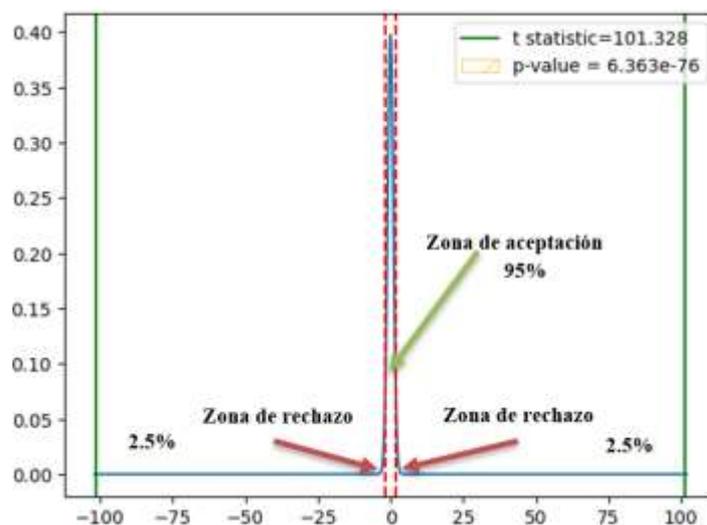


Ilustración 4-20: Comparación de muestras a 0 y 54° dos colas

Realizado por: Orozco W., 2024.

Como se pudo observar en la comparación realizada anteriormente entre la media de los valores tomados de velocidad de vibración a 0° y la media de los valores tomados de velocidad de vibración a 54° que estos difieren o no son iguales, por lo que ahora se pretende comprender de qué manera difieren exactamente, aplicando la siguiente condición:

H0: $\mu_2 > \mu_1$. La velocidad de vibraciones rms a 54° es mayor que a 0° (hipótesis nula)

H1: $\mu_2 < \mu_1$. La velocidad de vibraciones rms a 54° es menor que a 0° (hipótesis alternativa)

Donde:

μ_1 = media de las mediciones de vibraciones tomadas a 0°

μ_2 = media de las mediciones de vibraciones tomadas a 54°

```
stats.ttest_ind(vibraciones['54°'], vibraciones['0°'],  
alternative='less')
```

```
TtestResult(statistic=-101.32812698480248, pvalue=3.181572152030941e-76,  
df=68.0)
```

Como se obtuvo un p valor = 3.181572152030941e-76 el cual es menor a 0.05 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, concluyendo que existe suficiente evidencia para aseverar que la velocidad de vibración rms a 54° es menor que a 0°, con un 95% de confianza.

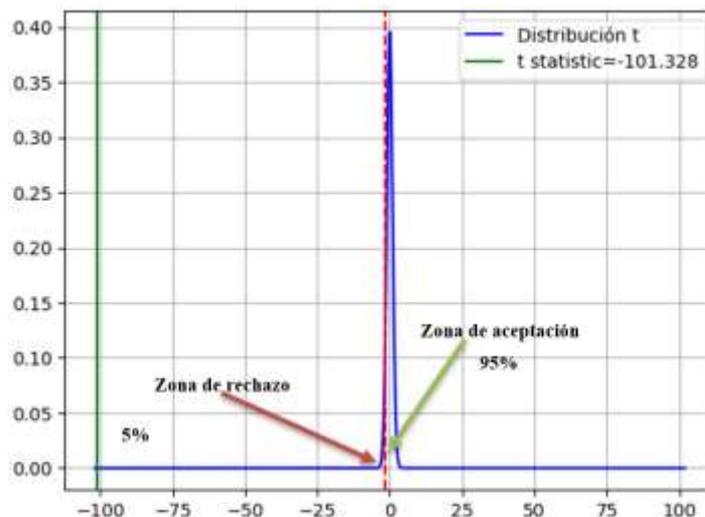


Ilustración 4-21: Comparación de muestras a 0 y 54° cola izquierda

Realizado por: Orozco W., 2024.

4.1.12.10 Comparación de muestras a 0° y a 60°

Luego de comparar las muestras de medición de vibración a 0° y a 54° se procede a comparar las muestras entre las mediciones de 0° y 60° estableciendo la siguiente condición:

H0: $\mu_1 = \mu_2$. La velocidad de vibraciones rms a 0° es igual que a 60° (hipótesis nula)

H1: $\mu_1 \neq \mu_2$. La velocidad de vibraciones rms a 0° es diferente que a 60° (hipótesis alternativa)

Donde:

μ_1 = media de las mediciones de vibraciones tomadas a 0°

μ_2 = media de las mediciones de vibraciones tomadas a 60°

```
stats.ttest_ind(vibraciones['0°'], vibraciones['60°'], alternative='two-sided')
```

```
TtestResult(statistic=99.96949056468065, pvalue=1.5838127352459786e-75, df=68.0)
```

Luego de la comparación se obtuvo un resultado de un p valor = 1.5838127352459786e-75 el mismo que es menor a 0,05 por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, concluyendo que existe suficiente evidencia para aseverar que la velocidad de vibraciones rms a 0° es diferente que a 60°, con un 95% de confianza.

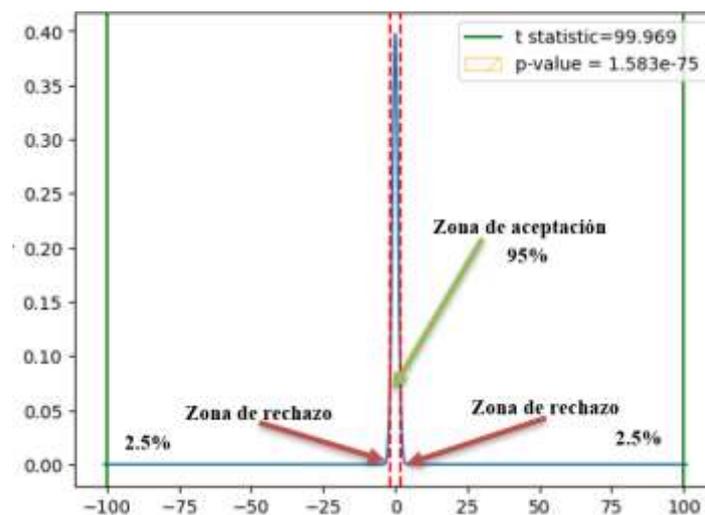


Ilustración 4-22: Comparación de muestras a 0 y 60° dos colas

Realizado por: Orozco W., 2024.

Como se pudo observar en la comparación realizada anteriormente entre la media de los valores tomados de velocidad de vibración a 0° y la media de los valores tomados de velocidad de vibración a 60° que estos difieren o no son iguales, por lo que ahora se pretende comprender de qué manera difieren exactamente, aplicando la siguiente condición:

H0: $\mu_2 > \mu_1$. La velocidad de vibraciones rms a 60° es mayor que a 0° (hipótesis nula)

H1: $\mu_2 < \mu_1$. La velocidad de vibraciones rms a 60° es menor que a 0° (hipótesis alternativa)

Donde:

μ_1 = media de las mediciones de vibraciones tomadas a 0°

μ_2 = media de las mediciones de vibraciones tomadas a 60°

```
stats.ttest_ind(vibraciones['60°'], vibraciones['0°'],  
alternative='less')
```

```
TtestResult(statistic=-99.96949056468065, pvalue=7.919063676229893e-76,  
df=68.0)
```

Como se obtuvo un p valor = 7.919063676229893e-76 el cual es menor a 0.05 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, concluyendo que existe suficiente evidencia para aseverar que la velocidad de vibración rms a 60° es menor que a 0°, con un 95% de confianza.

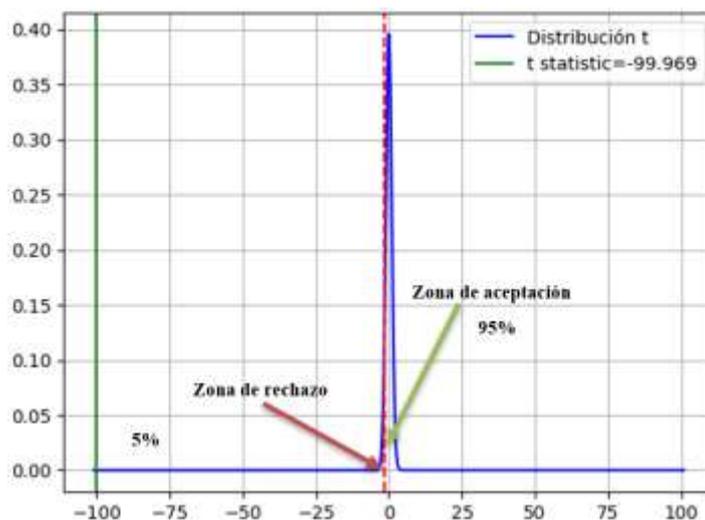


Ilustración 4-23: Comparación de muestras a 0 y 60° cola izquierda

Realizado por: Orozco W., 2024.

Como se pudo observar en la comparación realizada anteriormente entre la media de los valores tomados de velocidad de vibración a 0° y la media de los valores tomados de velocidad de vibración a 66° que estos difieren o no son iguales, por lo que ahora se pretende comprender de qué manera difieren exactamente, aplicando la siguiente condición:

H0: $\mu_2 > \mu_1$. La velocidad de vibraciones rms a 66° es mayor que a 0° (hipótesis nula)

H1: $\mu_2 < \mu_1$. La velocidad de vibraciones rms a 66° es menor que a 0° (hipótesis alternativa)

Donde:

μ_1 = media de las mediciones de vibraciones tomadas a 0°

μ_2 = media de las mediciones de vibraciones tomadas a 66°

```
stats.ttest_ind(vibraciones['66°'], vibraciones['0°'],  
alternative='less')
```

```
TtestResult(statistic=-101.0695580279107, pvalue=3.7810050950859336e-76,  
df=68.0)
```

Como se obtuvo un p valor = 3.7810050950859336e-76 el cual es menor a 0.05 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, concluyendo que existe suficiente evidencia para aseverar que la velocidad de vibración rms a 66° es menor que a 0°, con un 95% de confianza.

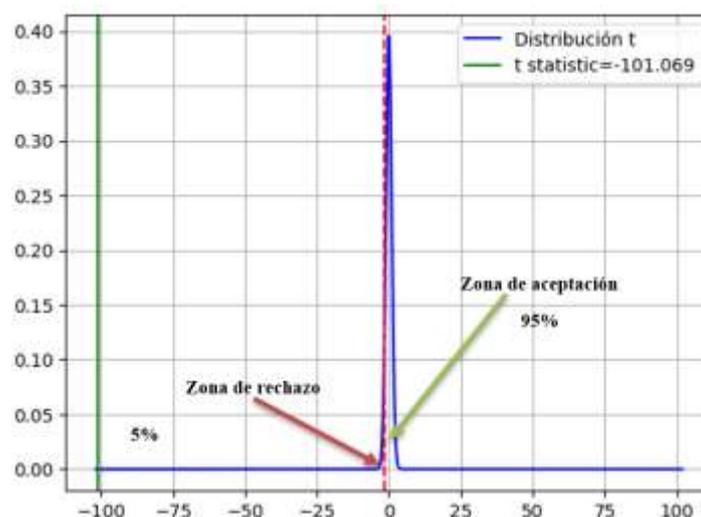


Ilustración 4-23: Comparación de muestras a 0 y 60° cola izquierda

Realizado por: Orozco W., 2024.

4.1.13 Comprobación de la hipótesis

En el marco del estudio presentado en el Capítulo I, se establecieron dos hipótesis, la hipótesis nula (H_0) y la alternativa (H_a). La hipótesis nula plantea que el ángulo de ubicación del sensor no influye en la confianza de la medición radial de vibraciones, lo que implica que los valores de velocidad de vibración radial no varían, es decir que van a ser iguales o similares indistintamente en la posición que se coloque el sensor, por otro lado, la hipótesis alternativa plantea que el ángulo de ubicación del sensor influye en la confianza de la medición radial de vibraciones, lo que quiere decir que los valores de velocidad de vibración radial si varían, es decir que en cada posición que se coloque el sensor se obtendrán diferentes medidas.

Como se pudo observar en cada una de las comparaciones realizadas anteriormente entre la medida de referencia que fue la media de los valores de vibración radial tomadas horizontalmente a 0° de inclinación con cada una de las medias que fueron tomadas variando el ángulo de inclinación cada 6° se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 4-1: Comparación de muestras dos colas

Comparación de muestras	Hipótesis nula (H_0)	Hipótesis alternativa (H_a)	Comprobación de la hipótesis
0° y 6°	La velocidad de vibraciones rms a 0° es igual que a 6°	La velocidad de vibraciones rms a 0° es diferente que a 6°	Se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alternativa
0° y 12°	La velocidad de vibraciones rms a 0° es igual que a 12°	La velocidad de vibraciones rms a 0° es diferente que a 12°	Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa
0° y 18°	La velocidad de vibraciones rms a 0° es igual que a 18°	La velocidad de vibraciones rms a 0° es diferente que a 18°	Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa
0° y 24°	La velocidad de vibraciones rms a 0° es igual que a 24°	La velocidad de vibraciones rms a 0° es diferente que a 24°	Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa
0° y 30°	La velocidad de vibraciones rms a 0° es igual que a 30°	La velocidad de vibraciones rms a 0° es diferente que a 30°	Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa
0° y 36°	La velocidad de vibraciones rms a 0° es igual que a 36°	La velocidad de vibraciones rms a 0° es diferente que a 36°	Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa
0° y 42°	La velocidad de vibraciones rms a 0° es igual que a 42°	La velocidad de vibraciones rms a 0° es diferente que a 42°	Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa
0° y 48°	La velocidad de vibraciones rms a 0° es igual que a 48°	La velocidad de vibraciones rms a 0° es diferente que a 48°	Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa
0° y 54°	La velocidad de vibraciones rms a 0° es igual que a 54°	La velocidad de vibraciones rms a 0° es diferente que a 54°	Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa
0° y 60°	La velocidad de vibraciones rms a 0° es igual que a 60°	La velocidad de vibraciones rms a 0° es diferente que a 60°	Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa
0° y 66°	La velocidad de vibraciones rms a 0° es igual que a 66°	La velocidad de vibraciones rms a 0° es diferente que a 66°	Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa

Realizado por: Orozco W., 2024.

Como se puede observar en la tabla 4-1 la hipótesis nula únicamente fue aceptada cuando las mediciones se realizaron con una inclinación del sensor de hasta 6° respecto a la medida de referencia que fue la horizontal, en cambio la hipótesis alternativa fue aceptada en todas las demás mediciones que se realizaron con respecto a la medida de referencia, por lo que de manera general se puede afirmar que el ángulo de inclinación del sensor si influye en la confianza de la medición radial de vibraciones, por consiguiente se rechaza la hipótesis nula (Ho) y se acepta la hipótesis alternativa (Ha) que fue planteada en esta investigación.

Luego de que se comprobó la hipótesis alternativa (Ha) que planteaba que el ángulo de ubicación del sensor si influye en la confianza de la medición radial de vibraciones, es decir que los valores son diferentes en cada posición que es colocado el sensor excepto en la posición a 6° se procedió a establecer de qué manera varían dichos valores para lo cual se realizaron estas comparaciones:

Tabla 4-2: Comparación de muestras cola izquierda

Comparación de muestras	Hipótesis nula (Ho)	Hipótesis alternativa (Ha)	Comprobación de la hipótesis
0° y 12°	La velocidad de vibraciones rms a 12° es mayor que a 0°	La velocidad de vibraciones rms a 12° es menor que a 0°	Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa
0° y 18°	La velocidad de vibraciones rms a 18° es mayor que a 0°	La velocidad de vibraciones rms a 18° es menor que a 0°	Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa
0° y 24°	La velocidad de vibraciones rms a 24° es mayor que a 0°	La velocidad de vibraciones rms a 24° es menor que a 0°	Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa
0° y 30°	La velocidad de vibraciones rms a 30° es mayor que a 0°	La velocidad de vibraciones rms a 30° es menor que a 0°	Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa
0° y 36°	La velocidad de vibraciones rms a 36° es mayor que a 0°	La velocidad de vibraciones rms a 36° es menor que a 0°	Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa
0° y 42°	La velocidad de vibraciones rms a 42° es mayor que a 0°	La velocidad de vibraciones rms a 42° es menor que a 0°	Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa
0° y 48°	La velocidad de vibraciones rms a 48° es mayor que a 0°	La velocidad de vibraciones rms a 48° es menor que a 0°	Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa
0° y 54°	La velocidad de vibraciones rms a 54° es mayor que a 0°	La velocidad de vibraciones rms a 54° es menor que a 0°	Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa
0° y 60°	La velocidad de vibraciones rms a 60° es mayor que a 0°	La velocidad de vibraciones rms a 60° es menor que a 0°	Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa
0° y 66°	La velocidad de vibraciones rms a 66° es mayor que a 0°	La velocidad de vibraciones rms a 66° es menor que a 0°	Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa

Realizado por: Orozco W., 2024.

Como se puede observar en la tabla 4-2 luego de realizar las comparaciones descritas allí la manera en que varían los valores de velocidad de vibración es descendente es decir empieza en un cierto valor a 0° y dicho valor va disminuyendo hasta llegar a los 66°.

Por lo que se puede concluir que existe suficiente evidencia para aseverar que el ángulo de ubicación del sensor si influye en la confianza de la medición radial de vibraciones específicamente en este estudio el ángulo de ubicación del sensor influye de manera que los valores van descendiendo a medida que el ángulo de ubicación va aumentado.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Los hallazgos evidencian que las mediciones de vibración radial tienen diferencias significativas cuando el ángulo de ubicación del sensor sobrepasa los 6° con respecto a la medición horizontal, lo que resalta la importancia de considerar la posición del sensor al realizar análisis de vibraciones en equipos con diseños donde no es posible colocar el sensor en una posición perfectamente horizontal.

Luego de realizar un análisis al módulo de ensayos de vida acelerada se estableció que el requisito fundamental para realizar mediciones de vibración radial en diversas posiciones era sustituir la caja de rodamiento existente la misma que limitaba las mediciones a posiciones únicamente horizontal y vertical, por lo que se requirió una nueva caja y se determinó mediante un análisis que el diseño de dicha caja permita tener lados planos para ir ajustando variando la posición del sensor cada 6° .

Se desarrolló un modelo eficiente de recolección de datos, el cual implicó la toma de las 35 mediciones de velocidad global de vibración radial RMS en cada posición en el que el sensor fue ubicado de manera repetitiva y consecutiva, asegurando así que todas las mediciones se realicen en las mismas condiciones del módulo, este enfoque garantizó una recolección precisa y confiable de información a lo largo del estudio, eliminando variaciones potenciales en las condiciones del equipo que pudiesen haber afectado los resultados.

Tras obtener los datos de vibración radial con diferentes ángulos de inclinación del sensor se evidenció una tendencia consistente ya que a medida que se variaba el ángulo de inclinación del sensor la velocidad de vibración rms disminuía, en la posición horizontal, con un ángulo de inclinación de 0° la media de la velocidad de vibración fue de 9.37, sin embargo, al aumentar la inclinación a 66° la cual fue la máxima posible que se pudo medir esta media descendió a 4.06 este hallazgo es significativo, ya que en situaciones reales en donde el diseño de una máquina no permita tomar mediciones horizontales directas, la variación del ángulo de inclinación del sensor puede resultar en mediciones sesgadas, este sesgo puede llevar a errores en la evaluación de la severidad de vibración y, consecuentemente, en el diagnóstico técnico del equipo.

La investigación proporciona descubrimientos significativos sobre la influencia del ángulo de inclinación del sensor en la confianza de las mediciones de vibración radial. Estos hallazgos no solo mejoran la comprensión de los desafíos asociados con la medición de vibraciones en equipos con diseños no convencionales, sino que también abren nuevas líneas de investigación para desarrollar soluciones y herramientas más efectivas en el análisis de vibraciones industriales.

RECOMENDACIONES

Es fundamental emplear el equipo de protección personal adecuado, como guantes, tapones auditivos, mandil y gafas protectoras, al trabajar en el laboratorio. Dado que en este entorno se manejan diversos equipos, la falta de precaución podría dar lugar a accidentes.

Es importante garantizar que todos los equipos que se utilizan para realizar análisis de vibraciones estén en óptimas condiciones, esto ayudara a prevenir errores y a obtener datos con mayor precisión durante el proceso de recolección.

Verificar que al momento de recolectar los datos no existan otras fuentes de vibración cercanas al módulo en donde se lleva a cabo el estudio. Esto garantizara que las mediciones no se vean afectadas por interferencias externas y que los resultados reflejen con precisión el comportamiento vibratorio del equipo bajo análisis.

Cuando se configure el software MAINTraQ Predictive se recomienda establecer un total de 3200 líneas espectrales para la toma de datos. Esta configuración mejorara la precisión de las mediciones, permitiendo obtener resultados más exactos y detallados

BIBLIOGRAFÍA

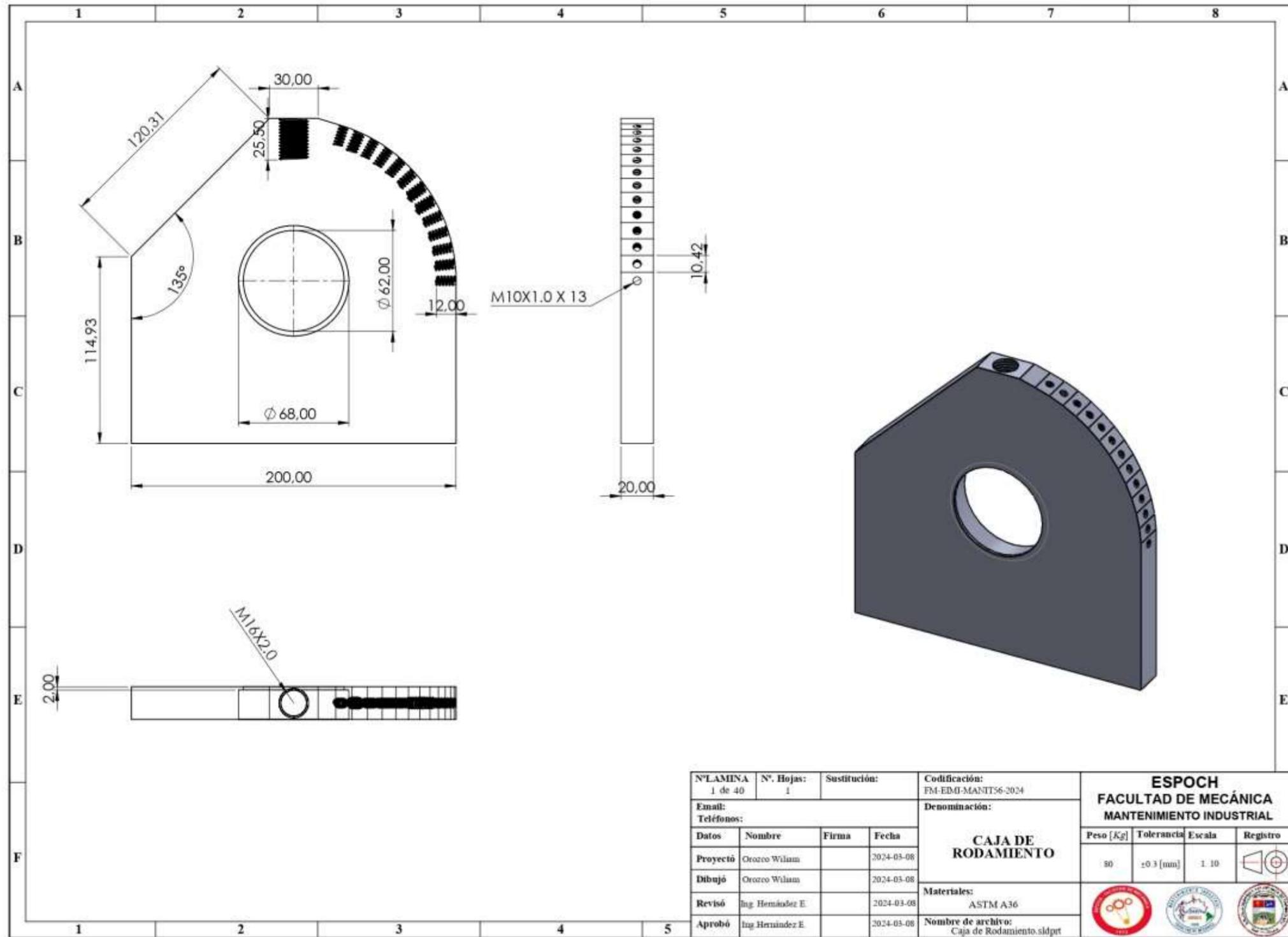
- 1 **ALZATE, Edwin.** “Estimacion de la incertidumbre de medicion en el ensayo de alcalinidad de acuerdo a la guia gtc 51”. *Scientia Et Technica* [en línea], 2008, (Colombia), vol. XIV(38), págs. 375-380. [Consulta: 20 Marzo de 2024]. ISSN: 0122-1701. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=849038>
- 2 **ASTM A36.** *Standard Specification for Carbon Structural Steel.* (2019).
- 3 **ESCAMILLA, Miguel; et al.** " Repetibilidad y Reproducibilidad en las Mediciones del Espesor de Tubos de Acero para Ferroaducto". *Conciencia Tecnológica* [en línea], 2020, (México), vol. 1 (59), págs. 1-13. [Consulta: 19 marzo de 2024]. ISSN: 1405-5597. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/944/94463783003/html/>
- 4 **GUERRERO, Adriana & DIAZ, Gloria.** *Introducción de Errores en la Medición* [en línea]. Colombia: ITM, 2007. [Consulta: 20 marzo de 2024]. Disponible en: <https://catalogo.itm.edu.co/gpd-introduccion-de-errores-en-la-medicion-9789589831434.html>
- 5 **GUZMÁN, Nury & BALVANTÍN, Antonio.** “Diseño y fabricación de un sistema experimental para la medición de vibraciones mecánicas: estudio analítico”. *Jóvenes en la ciencia* [En línea], 2018, (Colombia), vol. 4 (2), págs. 3220-3224 [Consulta: 26 marzo de 2024]. Disponible en: <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/2819>
- 6 **HERNÁNDEZ, Eduardo; et al.** *Estadística descriptiva para el mantenimiento industrial con Python* [en línea]. Ecuador: Centro de Investigación y Desarrollo Ecuador, 2023. [Consulta: 1 abril 2024]. Disponible en: <https://repositorio.cidecuador.org/handle/123456789/2865>
- 7 **ISO-2041** *Vibraciones mecánicas golpes y monitoreo de la condición-Vocabulario.* 2009.
- 8 **ISO 10816-1.** *Mechanical vibration. Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts Part 1: General guidelines.*

- 9 ISO 13373-1.** *Vibration condition monitoring-General procedures*
- 10 LENTIJO NOVAL, Adrián.** Análisis de vibraciones con radar Doppler: determinación de los modos de vibración de una caja rectangular. [En línea]. (Trabajo de titulación) (Grado). Universidad de Valladolid, Valladolid-España. 2018. págs. 1-53. [Consulta: 2024-03-25]. Disponible en: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/32034/TFG-G2992.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- 11 MANZANARES DEL MORAL, Alberto.** Modelos Matemáticos de Acelerómetros Comerciales [En línea]. (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Universidad de Sevilla, Sevilla-España. 2008. Págs. 6-111. [Consulta: 2024-03-25]. Disponible en: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/11669/fichero/Memoria.pdf>
- 12 RAO, Singiresu.** *Vibraciones mecánicas* [en línea]. 5 ed. México: Pearson Educación, 2012. [Consulta: 20 marzo de 2024]. Disponible en: <https://archive.org/details/VibracionesMecanicasRao5taEd1>
- 13 ROSERO, Ricardo; et al.** “Predicción del consumo de materia seca de forraje en vacas lecheras mediante el uso de acelerómetros”. *Información tecnológica* [en línea], 2022, (Colombia), vol. 33, (4), págs. 63-72. [Consulta: 20 marzo de 2024]. ISSN 0718-0764. Disponible en: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642022000400063&lng=en&nrm=iso&tlng=en
- 14 SOSA, Acerina** Aportaciones al diseño y fabricación de transductores piezoresistivos sobre membranas en tecnología MetalMUMPs de MEMSCAP. [en línea]. (Trabajo de Titulación) (Maestría) España: Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Islas Canarias. España. 2013. págs. 7-76. [Consulta: 2024-11-23]. Disponible en: <https://acedacris.ulpgc.es/jspui/handle/10553/68974>.
- 15 TRIOLA, Mario.** *Estadística* [en línea]. 10 ed. México: Pearson Educación, 2009. [Consulta: 20 marzo de 2024]. Disponible en: <https://www.uv.mx/rmipe/files/2015/09/Estadistica.pdf>

- 16 UNIVERSIDAD DE SEVILLA.** Sensor medidor de Aceleración. 2017. Disponible en:
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11638/fichero/Capitulo+4.pdf>
- 17 VALVERDE, Vanessa; et al.** *Python aplicado al mantenimiento industrial* [en línea]. Ecuador: Centro de Investigación y Desarrollo Ecuador, 2023. [Consulta: 1 abril 2024]. Disponible en: <http://repositorio.cidecuador.org/jspui/handle/123456789/2696>
- 18 VILLASÍS, Miguel; et al.** "El protocolo de investigación VII. Validez y confiabilidad de las mediciones". *Revista Alergia México* [en línea], 2018, (México), vol. 65(4), págs. 414-421. [Consulta: 19 marzo de 2024]. ISSN: 0002-5151. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=486759225011>
- 19 WHITE, Glen.** *Introducción al Análisis de Vibraciones* [en línea]. Woburn-USA: Azima DLI, 2010. [Consulta: 20 marzo de 2024]. Disponible en: <https://termogram.com/images/pdf/analisis-vibraciones/introduccion-al-analisis-de-vibraciones-azima-dli.pdf>

ANEXOS

ANEXO A: PLANO CAJA DE RODAMIENTO



N° LAMINA 1 de 40	N° Hojas 1	Sustitución:	Codificación: FM-EDM-MANTIS6-2024	ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL																							
Email: Teléfonos:			Denominación:					Peso [Kg]	Tolerancia	Escala	Registro																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Datos</th> <th>Nombre</th> <th>Firma</th> <th>Fecha</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Proyectó</td> <td>Orozco Wilam</td> <td></td> <td>2024-03-08</td> </tr> <tr> <td>Dibujó</td> <td>Orozco Wilam</td> <td></td> <td>2024-03-08</td> </tr> <tr> <td>Revisó</td> <td>Ing. Hernández E.</td> <td></td> <td>2024-03-08</td> </tr> <tr> <td>Aprobó</td> <td>Ing. Hernández E.</td> <td></td> <td>2024-03-08</td> </tr> </tbody> </table>			Datos	Nombre	Firma	Fecha	Proyectó	Orozco Wilam		2024-03-08	Dibujó	Orozco Wilam		2024-03-08	Revisó	Ing. Hernández E.		2024-03-08	Aprobó	Ing. Hernández E.		2024-03-08	CAJA DE RODAMIENTO	80	±0.3 [mm]	1:10	
Datos	Nombre	Firma	Fecha																								
Proyectó	Orozco Wilam		2024-03-08																								
Dibujó	Orozco Wilam		2024-03-08																								
Revisó	Ing. Hernández E.		2024-03-08																								
Aprobó	Ing. Hernández E.		2024-03-08																								
Materiales: ASTM A36																											
Nombre de archivo: Caja de Rodamiento.sldprt																											



epoch

**Dirección de Bibliotecas y
Recursos del Aprendizaje**

**UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS
BIBLIOGRÁFICO Y DOCUMENTAL**

**REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y
BIBLIOGRAFÍA**

Fecha de entrega: 11 / 06 / 2024

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: WILIAM RODRIGO OROZCO CASTILLO
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: MECÁNICA
Carrera: MANTENIMIENTO INDUSTRIAL
Título a optar: INGENIERO EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL
f. Analista de Biblioteca responsable: Lic. Ángel Ramiro Frías Sánchez



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
CERTIFICADO DE CUMPLIMIENTO DE LA GUÍA PARA
NORMALIZACIÓN DE TRABAJOS DE FIN DE GRADO

Fecha de entrega: 11/06/2024

INFORMACIÓN DEL AUTOR
Nombres – Apellidos: WILIAM RODRIGO OROZCO CASTILLO
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: MECÁNICA
Carrera: MANTENIMIENTO INDUSTRIAL
Título a optar: INGENIERO EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL
 Ing. Eduardo Segundo Hernández Dávila Director del Trabajo de Titulación  Ing. Fausto Ulpiano Caicedo Benavides Asesor del Trabajo de Titulación