



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

“COMPARACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DE LAS TÉCNICAS DE ULTRASONIDO PASIVO Y ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN LA DETECCIÓN DE FALLAS INCIPIENTES EN RODAMIENTOS”

**GONZÁLEZ LUNA BYRON VINICIO
QUISPE SACA ROBERTO CARLOS**

TRABAJO DE TITULACIÓN

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO DE MANTENIMIENTO

**RIOBAMBA – ECUADOR
2015**

APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

2014-10-28

Yo recomiendo que el Trabajo de Titulación preparado por:

GONZÁLEZ LUNA BYRON VINICIO
QUISPE SACA ROBERTO CARLOS

Titulado:

“COMPARACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DE LAS TÉCNICAS DE
ULTRASONIDO PASIVO Y ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN LA
DETECCIÓN DE FALLAS INCIPIENTES EN RODAMIENTOS”

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

INGENIERO DE MANTENIMIENTO

Ing. Marco Santillán Gallegos
DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Pablo Fiallos Velasco
DIRECTOR

Ing. Eduardo Hernández Dávila
ASESOR

EXAMINACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: GONZÁLEZ LUNA BYRON VINICIO

TRABAJO DE TITULACIÓN: **“COMPARACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DE LAS TÉCNICAS DE ULTRASONIDO PASIVO Y ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN LA DETECCIÓN DE FALLAS INCIPIENTES EN RODAMIENTOS”**

Fecha de Examinación: 2015-11-17

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Fernando González Puente PRESIDENTE TRIB. DEFENSA			
Ing. Pablo Fiallos Velasco DIRECTOR			
Ing. Eduardo Hernández Dávila ASESOR			

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

RECOMENDACIONES: _____

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

Ing. Fernando González Puente
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

EXAMINACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: QUISPE SACA ROBERTO CARLOS

TRABAJO DE TITULACIÓN: “COMPARACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DE LAS TÉCNICAS DE ULTRASONIDO PASIVO Y ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN LA DETECCIÓN DE FALLAS INCIPIENTES EN RODAMIENTOS”

Fecha de Examinación: 2015-11-17

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Fernando González Puente PRESIDENTE TRIB. DEFENSA			
Ing. Pablo Fiallos Velasco DIRECTOR			
Ing. Eduardo Hernández Dávila ASESOR			

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

RECOMENDACIONES: _____

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

Ing. Ing. Fernando González Puente
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

DERECHOS DE AUTORÍA

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

González Luna Byron Vinicio

Quispe Saca Roberto Carlos

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a Dios por permitirme lograr cumplir una más de mis metas, a mis padres, abuelos, hermanos y familia en general por el apoyo, amor y comprensión brindado durante todo el largo camino que tuve que recorrer para cumplir uno de mis sueños, también un agradecimiento especial a todos los docentes que aportaron de una u otra manera en mi formación tanto académica como humana.

Byron Vinicio González Luna.

Con mucho amor este logro lo dedico a mis padres Carlos Quispe y Lucrecia Saca, los dos pilares fundamentales de mi vida, quienes supieron guiarme por el camino correcto, inculcándome valores, responsabilidad, humildad y apoyándome en todos los momentos para cumplir mi sueño, quiero decirles gracias todo el sacrificio que han realizado por encaminarme a ser un hombre de bien que no alcanzara mi vida para agradecerles todo lo que han hecho por mí.

A mi hijo Carlos Joshue para que de esta forma tenga presente que a base de esfuerzo y dedicación se puede alcanzar las metas y sueños que uno se propone. A mi mujer Tania Ortiz por comprenderme y apoyarme todo este momento ser mi complemento mostrando amor, apoyándome en los buenos y malos momentos.

Roberto Carlos Quispe Saca

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por prestarme la vida para cumplir una más de mis metas, a mis padres, abuelos, hermanos y familia en general por su esfuerzo y apoyo que me han sabido dar, a mis amigos con quienes compartí el salón y vivencias únicas, a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo en especial a la Escuela de Ingeniería de Mantenimiento por permitir obtener un título profesional, a los ingenieros que supieron compartir sus conocimientos formándonos como buenos profesionales.

Byron Vinicio González Luna.

Agradezco a mi Dios por darme la vida, acompañarme durante toda mi carrera, por darme fortaleza y valor necesario para continuar sin desmayar, a mis hermanas Verónica, Susana y Mónica por estar siempre pendientes de mí, brindando su apoyo con palabras correctas en el momento justo, además de entregarme su confianza y que con su esfuerzo me han inspirado y ayudado a conseguir mis metas y seguir adelante

Mi más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo en especial a la Escuela de Ingeniería de Mantenimiento por los conocimientos teóricos y prácticos que me han impartido para que pudiéramos irnos formando como profesionales y personas de bien.

Roberto Carlos Quispe Saca

CONTENIDO

	Pág.
1. GENERALIDADES	
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Justificación.....	2
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 <i>Objetivo general.</i>	2
1.3.2 <i>Objetivos específicos:</i>	2
2. MARCO TEÓRICO	
2.1 Generalidades de rodamientos.....	4
2.1.1 <i>Definición.</i>	4
2.1.2 <i>Partes.</i>	4
2.1.2.1 <i>Elementos Rodantes</i>	4
2.1.2.2 <i>Anillos</i>	4
2.1.2.3 <i>Jaula o Separador</i>	5
2.1.2.4 <i>Lubricación</i>	5
2.1.2.5 <i>Protección</i>	5
2.1.3 <i>Clasificación</i>	5
2.1.4 <i>Materiales de los rodamientos</i>	8
2.1.5 <i>Procesos de Fabricación</i>	8
2.1.6 <i>Normalizaciones</i>	8
2.1.7 <i>Utilización de rodamientos</i>	9
2.1.8 <i>Frecuencias características de fallos</i>	10
2.1.9 <i>Etapas de falla en un rodamiento</i>	10
2.2 Factores que causan las fallas en rodamientos.	13
2.2.1 <i>Desalineamiento</i>	13
2.2.2 <i>Desbalanceo</i>	14
2.2.3 <i>Contaminación</i>	16
2.2.4 <i>Una lubricación inadecuada</i>	16
2.2.5 <i>Sobrecarga</i>	18
2.2.6 <i>Incorrecta manipulación e instalación</i>	19
2.3 Efecto de fallas en rodamientos.....	19
2.4 Prevención de fallas en rodamientos.	20
2.5 Inspecciones de rodamientos por análisis de vibraciones.	20
2.5.1 <i>Análisis de vibración</i>	20
2.5.1.1 <i>Transformada rápida de Fourier</i>	21
2.5.1.2 <i>Espectro.</i>	21
2.5.1.3 <i>Envolvente de aceleración</i>	22
2.5.1.4 <i>Filtro</i>	22
2.5.1.5 <i>Severidad de vibración</i>	23
2.5.1.6 <i>Spike de energía</i>	23
2.5.1.7 <i>Tipos de vibraciones</i>	23
2.5.1.8 <i>Magnitudes de las vibraciones.</i>	24
2.5.2 <i>Inspección de Rodamientos por vibraciones</i>	25
2.6 Inspecciones de rodamientos por ultrasonido pasivo.	25
2.6.1 <i>Ultrasonido Pasivo</i>	25
2.6.1.1 <i>Principio físico.</i>	26

2.6.1.2	<i>Severidad del sonido</i>	26
2.6.2	<i>Inspección de Rodamientos por ultrasonido</i>	27
3.	DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBA	
3.1	Sistemas del banco de pruebas.	28
3.1.1	<i>Sistema de Potencia</i>	28
3.1.2	<i>Sistema de Transmisión</i>	29
3.1.3	<i>Sistema de Lubricación</i>	29
3.1.4	<i>Sistema eléctrico</i>	30
3.2	Selección del motor.	30
3.3	Selección del sistema de transmisión.	31
3.3.1	<i>Selección del eje</i>	31
3.3.2	<i>Selección del acople</i>	33
3.3.3	<i>Selección de las chumaceras</i>	34
3.3.4	<i>Selección de poleas</i>	35
3.3.5	<i>Selección de banda</i>	35
3.4	Selección de rodamiento.....	36
3.5	Sistema de lubricación.....	37
3.5.1	<i>Selección del sistema de lubricación</i>	37
3.6	Sistema eléctrico.....	37
3.7	Diseño de la estructura del banco de pruebas.....	38
3.8	Montaje del banco de pruebas.	39
4.	MEDICIÓN DE VIBRACIONES Y ULTRASONIDO	
4.1	Introducción.....	43
4.1.1	<i>Metodología</i>	43
4.1.1.1	<i>Equipo de ultrasonido pasivo ULTRAPROBE 15000</i>	43
4.1.1.2	<i>Equipo de diagnóstico vibracional VIBRACHEK 200</i>	46
4.1.2	<i>Ubicación de puntos</i>	47
4.1.3	<i>Frecuencias generadas por los rodamientos</i>	48
4.2	Mediciones en estado normales de funcionamiento.	49
4.2.1	<i>Mediciones de análisis de vibraciones en condiciones normales</i>	49
4.2.2	<i>Mediciones de ultrasonido pasivo en condiciones normales</i>	50
4.3	Desalineación angular controlada.....	51
5.	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	
5.1	Espectros característicos para el rodamiento en buen estado.	54
5.2	Comparación de resultados con 5,2 mrad de desalineación angular.	56
5.3	Comparación de resultados con 10,4 mrad de desalineación angular.	59
5.4	Comparación de resultados con 15,7 mrad de desalineación angular.	61
5.5	Comparación de resultados con 22,7 mrad de desalineación angular.	63
5.1.1	<i>Análisis detallado de envolvente de vibraciones por medio de etapas</i>	66
5.1.2	<i>Análisis detallado de ultrasónico pasivo por medio de etapas</i>	71
5.6	Comparación y diagnostico mediante valores globales de vibración RMS.	74
5.6.1	Análisis mediante el valor RMS de vibración total en Aceleración.....	75
5.6.1.1	<i>Análisis para 5,2 mrad a 100% del tiempo total de ensayo.</i>	75
5.6.1.2	<i>Análisis para 10,4 mrad a 100% del tiempo total del ensayo.</i>	76
5.6.1.3	<i>Análisis para 15,7 mrad a 100% del tiempo total del ensayo.</i>	77
5.6.1.4	<i>Análisis para 22,7 mrad a 100% del tiempo total del ensayo.</i>	79
5.7	Discusiones finales	80

6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
6.1	Conclusiones.....	82
6.2	Recomendaciones.	83

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

LISTA DE TABLAS

	Pág.
1 Severidad del sonido.....	26
2 Lista de requerimientos.	28
3 Datos técnicos del motor.	31
4 Características de Chumacera CMB, HCP204.	35
5 Característica del rodamiento.	36
6 Propiedades de la grasa NLGI 3.	37
7 Frecuencias generadas.	48
8 Armónicos de las frecuencias en Hz.....	48
9 Armónicos de las frecuencias en CPM.....	49
10 Valores en condiciones normales correspondientes a Análisis de vibraciones.	50
11 Valores en condiciones normales correspondientes a Ultrasonido.	51
12 Valores registrados para 5,2 mrad de desalineación.....	52
13 Valores registrados para 10,4 mrad de desalineación.....	52
14 Valores registrados para 15,7 mrad de desalineación.....	53
15 Valores registrados para 22,7 mrad de desalineación.....	53
16 Tiempo de detección de fallas incipientes.	53
17 Tabla referencial para evaluar estado de condición en rodamientos.	74
18 Valores de RMS para vibraciones (Aceleración).	75
19 Incremento de amplitud para 5,2 mrad de desalineación.	76
20 Valores de RMS para vibraciones (Aceleración).	76
21 Incremento de amplitud para 10,4 mrad de desalineación.	77
22 Valores de RMS para vibraciones (Aceleración).	78
23 Incremento de amplitud para 15,7 mrad de desalineación.	79
24 Valores RMS para vibraciones (Aceleración).	79
25 Incremento de amplitud para 22,7 mrad de desalineación.	80

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
1 Partes de un rodamiento.....	4
2 Rodamiento de bola.	6
3 Rodamiento de rodillos.	6
4 Rodamiento de Rodillo esférico.	7
5 Rodamiento de Rodillo cónico.	7
6 Etapa 1 de daño de un rodamiento.....	11
7 Etapa 2 de daño de un rodamiento.....	11
8 Etapa 3 de daño de un rodamiento.....	12
9 Etapa 4 de daño de un rodamiento.....	12
10 Desalineamiento paralelo.....	13
11 Desalineación angular.....	14
12 Desalineación entre chumaceras.....	14
13 Desbalance estático.....	15
14 Desbalanceo dinámico.	15
15 Desbalanceo por rotor colgante.	15
16 Rodamiento contaminado por partículas externas.	16
17 Rodamiento dañado por una inadecuada lubricación.	16
18 Decoloración del rodamiento por falta de lubricación.....	17
19 Degradación del rodamiento con desprendimiento de material.....	18
20 Rodamiento dañado por sobrecarga.....	18
21 Daño por causa de un inadecuado montaje.....	19
22 Motor eléctrico trifásico de 1/2 Hp.....	29
23 Sistema de transmisión.	29
24 Punto de lubricación de chumacera.	30
25 Arrancador.	30
26 Chumacera CMB, HCP204.....	34
27 Rodamiento de bola de ranura profunda 6204-RS.....	36
28 Estructura del banco de pruebas.	38
29 Montaje de Motor en la Estructura.	39
30 Montaje de Chumaceras en la Estructura.	39
31 Montaje de Ejes y Poleas en la Estructura.....	40
32 Montaje de Correa en Poleas.	40
33 Montaje de Modulo de Inserción de Desalineación.....	41
34 Alineación laser.	41
35 Alineación de poleas.....	42
36 Ultraprobe 15000.	44
37 Accesorios Ultraprobe 15000.	45
38 Vibrachek 200.....	46
39 Puntos de medición.....	48

40	Espectros de vibraciones en aceleración de rodamiento en buen estado.....	49
41	Espectros de Envolvente para rodamiento en buen estado.....	50
42	Espectro de ultrasonido para rodamiento en buen estado.....	51
43	Espectro de Vibración del rodamiento 6204 en buen estado.....	55
44	Espectro de Envolvente para rodamiento 6204 en Buen Estado.....	55
45	Espectro de Ultrasonido del rodamiento 6204 en buen estado.....	56
46	Espectro de envolvente de vibración para 5,2 mrad de desalineación.....	56
47	Espectro de Aceleración para 5,2 mrad de desalineación.....	57
48	Espectro de ultrasonido con 5,2 mrad de desalineación.....	57
49	Grafica Amplitud vs tiempo para 5,2 mrad de desalineación.....	58
50	Curva de tendencia de 5,2 mrad de desalineación.....	58
51	Espectro de Vibración (Envolvente) para 10,4 mrad de desalineación.....	59
52	Espectro de ultrasonido con 10,4 mrad de desalineación.....	60
53	Grafica de curvas de tendencia de vibraciones (envolvente).....	60
54	Grafica de curva de tendencia de ultrasonido.....	61
55	Espectro de vibración (Envolvente) 15,7 mrad de desalineación.....	61
56	Espectro de Ultrasonido para 15,7 mrad de desalineación.....	62
57	Grafica de tendencia de vibraciones (envolvente).....	62
58	Grafica de tendencia de ultrasonido.....	63
59	Espectro de vibración (Envolvente) para 22,7 mrad de desalineación.....	63
60	Espectro de Ultrasonido para rodamiento 22,7 mrad de desalineación.....	64
61	Grafica de tendencia de vibraciones (envolvente).....	65
62	Grafica de tendencia para ultrasonido.....	65
63	Espectro de envolvente de Vibraciones.....	66
64	Espectro de envolvente de Vibraciones rodamiento 6204.....	67
65	Espectro de envolvente de Vibraciones.....	67
66	Espectro de envolvente de Vibraciones.....	68
67	Espectro de envolvente de Vibraciones.....	69
68	Espectro de envolvente de Vibraciones.....	69
69	Espectro de envolvente de Vibraciones.....	70
70	Espectro de envolvente de Vibraciones.....	70
71	Espectro de ultrasonido Etapa 1.....	71
72	Espectro de ultrasonido Etapa 2.....	72
73	Espectro de ultrasonido Etapa 3.....	72
74	Espectro de ultrasonido Etapa 4.....	73
75	Espectro de ultrasonido Etapa 5.....	74
76	Curva de tendencia de 5,2 mrad de desalineación.....	75
77	Curva de tendencia de 10,4 mrad de desalineación.....	77
78	Curva de tendencia de 15,7 mrad de desalineación.....	78
79	Curva de tendencia de 22,7 mrad de desalineación.....	80

SIMBOLOGÍA

f	Frecuencia
dB	Decibeles
t	Tiempo
T	Periodo
<i>a</i>	Aceleración
V	Voltaje
P	Potencia

LISTA DE ANEXOS

- A** Las nueve etapas de fallos de rodamientos.
- B** Cartas de Charlotte 4 etapas de daño de un rodamiento.
- C** Diseño de los componentes de un motor eléctrico trifásico de 1/2 hp, marca WEG, modelo TE1BF.
- D** Selección del acople flexible Love-Joy, L. 075.
- E** Norma ISO 10816, 2009.
- F** Especificaciones técnicas de equipo Ultraprobe 15000.
- G** Especificaciones técnicas del equipo Vibrachek 200.

RESUMEN

La presente investigación describe la comparación entre la efectividad de la técnica de ultrasonido pasivo y análisis de vibraciones en la detección de fallas incipientes en rodamientos. Para ello se construyó un módulo didáctico para analizar, en el cual se realizaron varias desalineaciones angulares, controladas desde 5,2 hasta 22,7 mrad en intervalos de 5,2 mrad, durante cuatro horas de funcionamiento que corresponde al 100% del tiempo total que duro el ensayo para cada intervalo de desalineación a una velocidad de rotación del eje de 3750 rpm.

En la toma de datos de vibraciones se utilizó el equipo Vibrachek 200, con su respectivo acelerómetro para capturar el espectro, tanto en las posiciones radial y axial (ISO 10816-1,1995). Para el análisis se utilizó el espectro envolvente de aceleración dispuesto en la norma, la cual permite filtrar señales de vibración de alta frecuencia, de igual manera se usó un transductor magnético para la toma de datos de ultrasonido pasivo mediante el equipo Ultraprobe 15000.

Tras el análisis de los datos se concluyó que el análisis por ultrasonido pasivo es más efectivo que el análisis de vibraciones en la detección de fallas incipientes en rodamientos, debido a que la primera técnica permite visualizar cambios que se manifiestan en los componentes del rodamiento a altas frecuencias, sin dejar de lado al análisis de vibraciones el cual nos permite observar en el espectro las diferentes etapas que se producen durante la evolución de una falla incipiente en un rodamiento.

Se recomienda en el caso de realizar monitoreo con el equipo de ultrasonido, recordar realizar las mediciones con los mismos parámetros de funcionamiento con los cuales se realizó la medida de línea base, para de esta manera obtener un análisis más exacto de las condiciones del activo a monitorear.

Con este propósito, el presente trabajo de titulación se lo realizó bajo las líneas de investigación de la **ESPOCH-2012; ARTICULO 5**, para así contribuir con el sostenimiento del plan nacional del buen vivir e indirectamente con la nueva matriz productiva y energética del país.

ABSTRACT

This paper describes the comparison between the effectiveness of the technique of passive ultrasound and vibration analysis in detecting incipient bearing failure. For this analysis a training module was build where several angular, controlled from 5,2 to 22,7 mrad were performed at intervals of 5,2 mrad for 4 hour of operation corresponding to 100% of the total duration of the test for each interval to a misalignment of the shaft rotation speed 3750 rpm.

The Vibrachek 200 equipment was used, with its respective accelerometer data collection to capture the vibration spectrum in both radial and axial positions (ISO 10816-1, 1995). To analyze the spectrum envelope willing acceleration was used in the standard, which allows to filters signal of high frequency vibration; just as a magnetic for passive data collection using the Ultraprobe 15000 ultrasound transducer equipment was used.

After analyzing the data it was concluded that the passive analysis is more effective than ultrasonic vibration analysis in detecting incipient bearing failure, because the first technique to visualize changes that occur in the components of the bearings at high frequencies, without neglecting vibration analysis which allows us to observe spectrum different stages that occur during the development of an incipient failure of a bearing.

It is recommended, in the case of performing monitoring with ultrasound equipment; remember to measure with the same operating parameters with which the baseline measurement was performed, to thereby obtain a more accurate analysis of conditions active monitor.

For this purpose, the present researching works was made based on the investigation guidelines of **ESPOCH-2012; ARTICLE V**, thus contributing to the sustainability of the Plan Nacional del Buen Vivir and indirectly with the new production and energy matrix of the country.

CAPÍTULO I

1. GENERALIDADES

1.1 Antecedentes.

Las fallas en rodamientos es uno de los problemas comunes en maquinaria rotativa, el cual disminuye la vida útil del rodamiento de una manera prematura, aproximadamente el 50% de las fallas corresponden a rodamientos. En tanto que las fallas en rodamientos, asociadas a las pistas representan alrededor del 40% de las fallas totales en rodamientos teniendo presente que existe un orden de fallas de cada una de sus partes que componen un rodamiento.

Uno de los mayores factores que contribuyen al desgaste en una maquina es la fricción. Producto de los movimientos mecánicos, lo cual producen un amplio espectro de sonido. Al concéntranos en una banda especifica de alta frecuencia, la técnica de ultrasonido es capaz de detectar cambios finos en amplitud y calidad de sonido emitidos por equipo en operación.

El instrumento utilizado procesa estas señales de alta frecuencia que normalmente son indetectables y las modula hacia un rango frecuencial más bajo haciéndolos audibles; a través de la utilización de audífonos pueden ser escuchados y display pueden ser visualizados para su posterior análisis. A diferencia que en vibraciones obtenemos espectros de señales vibracionales el cual es resultado de transformar la señal del dominio del tiempo en el dominio de la frecuencia. Es la descomposición de una señal de tiempo en una colección de ondas senoidales.

Es por ello que el mantenimiento predictivo ocupa un papel cada vez más importante en la conservación de las máquinas dentro del proceso productivo en la industria, por lo cual, el presente trabajo de titulación se encamina a comparar la efectividad que tienen las técnicas de ultrasonido pasivo y análisis de vibraciones en las posibles fallas incipientes que se puedan desarrollar en rodamientos por causa de la desalineación angular, lo cual nos ayuda a identificar, analizar y controlar las posibles fallas que se encuentran presentes en la Industria.

1.2 Justificación.

Convencionalmente se realizaba el cambio de rodamientos de manera programada a ciertas horas de trabajo, con la aparición del mantenimiento predictivo lo que se hacía es detectar la falla antes de que se convierta en un problema, pero con el desarrollo de la tecnología estamos llegando no solo a detectar las fallas sino en poder intervenir en la falla que se está desarrollando, para tratar de corregir o al menos garantizar la producción de la falla.

Actualmente en el ámbito del mantenimiento predictivo existe varias técnicas utilizadas para la detección de fallas en mecanismos y maquinarias las más conocidas y aplicadas en la industria ecuatoriana son: la técnica de ultrasonido pasivo y la técnica del análisis de vibraciones, en la batalla de la predicción es importante determinar cuál de las dos técnicas pueden detectar una falla lo más tempranamente posible, motivo por el cual nace la pericia de saber cuál de estas dos posee la mayor efectividad en el momento de la ocurrencia de una falla.

Por tal motivo se justifica la ejecución de la tesis debido a que si detectamos a tiempo cualquier tipo de falla potencial se puede actuar con antelación para evitar cualquier consecuencia de falla y planificar una acción correctiva que pueda ser realizada sin interrumpir el proceso productivo, de tal manera que con la aplicación de este mantenimiento se logra aprovechar al máximo la vida útil del elemento o los elementos de los equipos en los que se realizan este análisis, disminuyendo los costos de mantenimiento y aumentando la fiabilidad de los equipos generando mayor rentabilidad en las industrias.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo general.* Comparar la efectividad de las técnicas de ultrasonido pasivo y análisis de vibraciones en la detección de fallas incipientes en rodamientos.

1.3.2 *Objetivos específicos:*

- Realizar un análisis preliminar acerca del principio de funcionamiento de rodamientos.

- Diseñar un banco de pruebas para el diagnóstico de fallas en rodamientos.
- Realizar las mediciones respectivas.
- Recolectar datos en el módulo de pruebas.
- Analizar los resultados obtenidos.

CAPÍTULO II

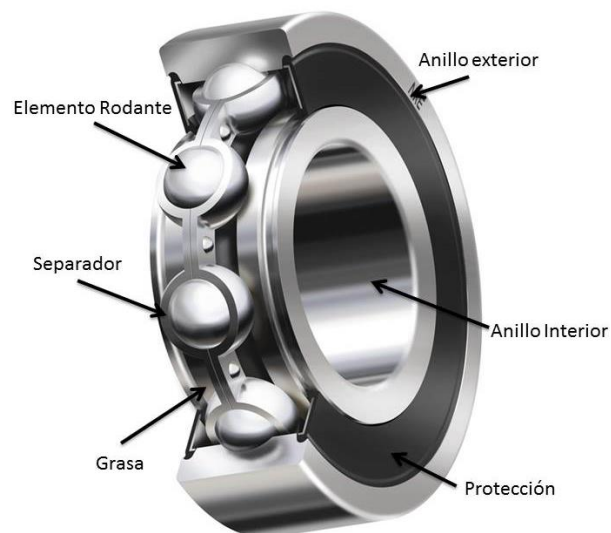
2. MARCO TEÓRICO

2.1 Generalidades de rodamientos

2.1.1 Definición. Es uno de los elementos de una máquina que sirve para reducir la fricción entre un eje y las piezas conectadas a éste, brindando soporte y permitiendo el movimiento entre un elemento mecánico y otro.

2.1.2 Partes.

Figura 1. Partes de un rodamiento.



Fuente: Catalogo SKF

Los componentes de los rodamientos consisten en:

2.1.2.1 Elementos Rodantes. Un juego de elementos rodantes que pueden ser de bolas o de rodillos que permiten el movimiento de ambos anillos con una fricción mínima.

2.1.2.2 Anillos. Dos anillos de acero que integran pistas de rodadura (superficies en las cuales “ruedan” los cuerpos rodantes). Los anillos pueden ser uno interior (más pequeño) y exterior (más grande).

2.1.2.3 Jaula o Separador. La jaula o separador se encarga de guiar a los elementos rodantes y evitando que entren en contacto entre sí.

2.1.2.4 Lubricación. Los rodamientos usan tanto las grasas como aceites para reducir la fricción. En el caso de los que utilizan grasas, las ventajas que alcanzan son una importante acción obturadora (son empleados en la industria alimenticia, del papel, textil, etc.), con el inconveniente de que originan un mayor rozamiento, por lo tanto, más calentamiento, por esta razón son usados a velocidades bajas (una correcta lubricación se logra no llenan de grasa todos los espacios vacíos del rodamiento: solo unos 2/3).

La lubricación por aceite se emplean cuando el cojinete es lubricado junto con otros elementos (como ruedas dentadas, etc...) que van montados en la misma máquina, cuando las velocidades son altas, o cuando se tienen temperaturas elevadas.

2.1.2.5 Protección. Una protección (deflector de acero o junta) asegura la estanquidad para que las partes del rodamiento se encuentren en perfectas condiciones, estas placas de protección se encuentran colocadas a cada lado del rodamiento para de tal manera evitar la entrada de contaminantes sólidos, estos ofrecen una solución económica y compacta para el problema de sellado evitando así un deterioro de los rodamientos y aumenta la vida útil del mismo.

2.1.3 Clasificación. Los cojinetes se pueden clasificar en tres grandes grupos como son en base a su forma del elemento rodante, a la carga que soportan ya sea radial y/o axial y a la inclinación del eje o árbol.

A continuación podemos distinguir su clasificación:

a) Por su forma:

- *De bolas.* Se conoce como rodamiento de bolas a dichos rodamiento que por su forma del elemento rodante tiene la forma de bola, son los más utilizados en las industrias en máquinas ya sea pequeños y medianos con el fin de reducir la fricción y el fácil movimiento entre un elemento mecánico y otro, de tal manera que le hace el rodamiento más ideal para el posterior análisis.

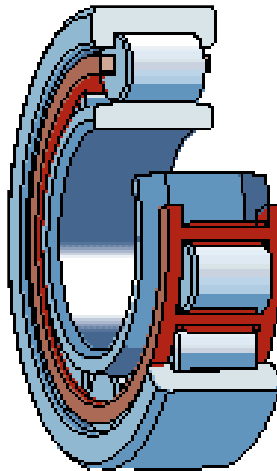
Figura 2. Rodamiento de bola.



Fuente: Catalogo SKF

- *De rodillos cilíndricos.* Sus elementos rodantes tienen la forma cilíndrica y pueden ser normales (los elementos rodantes son cilíndricos) y de agujas (los elementos rodantes son cilíndricos muy delgados, agujas que se montan directamente sobre el árbol).

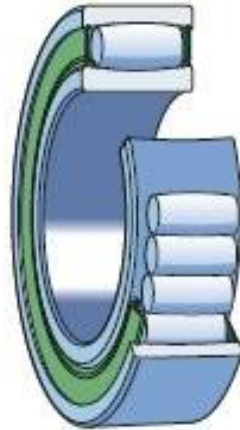
Figura 3. Rodamiento de rodillos.



Fuente: Catalogo SKF

- *De rodillos esféricos.* Sus elementos rodantes tienen la forma de rodillos esféricos, estos rodamientos fueron diseñados exclusivamente para soportar grandes esfuerzos, desalineaciones considerables, para utilizar en lugares extremadamente contaminantes, son capaces de soportar golpes y vibraciones moderadas, ya que por los índices de carga que se encuentran presentes en todo tipo de industria.

Figura 4. Rodamiento de Rodillo esférico.



Fuente: Catalogo SKF

- *De rodillos cónicos.* En los rodamientos de rodillos cónicos, los caminos de rodadura en los aros interior y exterior, y los rodillos son cónicos. Estos rodamientos han sido diseñados para soportar cargas combinadas, es decir, cargas que actúan de modo radial y axial simultáneamente.

Figura 5. Rodamiento de Rodillo cónico.



Fuente: Catalogo SKF

- b) Atendiendo al tipo de carga que soporta:
- *Radial.* Es aquel rodamiento que soporta solo carga radial.
 - *Axial.* Es aquel rodamiento que soporta solo carga axial.
 - *De empuje o mixtos.* Es aquel rodamiento que soporta los dos tipos de carga, axial y radial, simultáneamente.

c) Atendiendo a la inclinación del eje o árbol:

- *Rígidos.* Es aquel que no permiten ninguna oscilación del rodamiento respecto del árbol en un plano perpendicular al giro de los elementos rodantes.
- *Pivotantes.* Permiten una cierta oscilación del rodamiento respecto del árbol, en el plano mencionado anteriormente.

2.1.4 *Materiales de los rodamientos.* Tanto en los anillos de rodadura como en los elementos rodantes, el material más usado es el acero al cromo, con 1 por 100 de C y 1,5 por 100 Cr. También se utilizan Ni y Mo como elementos de aleación.

En algunas aplicaciones concretas se emplean materiales no férricos, e incluso materiales sintéticos (plásticos, fenólicos, nylon, etc.), las jaulas se fabrican de acero blanco, latón, plástico, etc.

2.1.5 *Procesos de Fabricación.* En la fabricación de los elementos rodantes se parte de varillas de material, sin tratar. Se cortan y se forman las bolas en tornos especiales, o bien se entienda directamente por estampación.

A continuación, se alisan entre dos platos paralelos girando en sentido diferentes. Luego se rectifican, para posteriormente someterlos a temple en hornos eléctricos. Después, son nuevamente rectificadas y pulidas con recortes de cuero, en tambores giratorios.

Posteriormente, se clasifican en ranuras de pequeña conicidad calibrada (la tolerancia en el diámetro es muy importante para evitar sobrecargas una vez montadas en el rodamiento).

Por último, se verifica su elasticidad (por choque) y su dureza, que debe estar en el orden de 500-700° brinell, los cojinetes de rodamientos solo se construye por casas muy especializadas, lo que ha llevado al establecimiento de tipos muy concretos y rodamientos altamente normalizados.

2.1.6 *Normalizaciones.* Como ya se ha dicho, los cojinetes de rodamientos son órganos de máquinas normalizados.

Las normalizaciones se refieren a las medidas externas (diámetros de los anillos interior y exterior, ancho, radios de los acuerdos, tolerancia de las dimensiones, etc.). Sin embargo, los elementos rodantes no están normalizados.

NOTA: Al hablar de normalizaciones hay que hacer una salvedad, en lo que a holgura y juego se refiere.

En efecto, ambas dimensiones no están normalizadas y dependen de cada casa constructor.

Además, la holgura (definida como diferencia entre los diámetros del círculo máximo de rodadura y el círculo envolvente de los rodillos o bolas) es evidentemente una característica constructiva pero no así el juego (definido como la magnitud del desplazamiento de un anillo respecto del otro), tomada en dirección radial y axial, desde un tope a otro, incluida la deformación elástica, que es una característica de funcionamiento.

Cuando la holgura de un cojinete viene fijada de fábrica se dice que es un cojinete cerrado. En caso contrario, cuando la holgura se ajusta durante el montaje (como es el caso de los cojinetes de rodillos cónicos) se denomina cojinete abierto.

2.1.7 Utilización de rodamientos. Los rodamientos son los encargados de disminuir la fricción entre eje y las piezas fijadas a él, también sirve para apoyar y facilitar el desplazamiento. Es así como los rodamientos tienen una gran importancia en la industria siendo uno de los elementos que más utilizados son en la construcción de cualquier tipo de máquina.

Los rodamientos son utilizados en:

- Motores de tamaño pequeño y mediano.
- Industria pesada para máquinas grandes.
- Industria automovilística.
- Industria Grafica
- Industria Textil

- Industria Aeroespacial.

2.1.8 Frecuencias características de fallos. Los métodos matemáticos son varios, los cuales permite acercarse a una representación lo más posible a la vibración que se genera en los rodamientos.

Cada vez que la superficie con el defecto choque contra la superficie del elemento rodante se produce un impulso que puede excitar resonancias en el rodamiento, esto quiere decir, una serie de golpes resonantes muy cortos que suceden a la frecuencia de paso de los elementos rodantes por sobre la superficie dañada del aro correspondiente.

Determinando las frecuencias asociadas de cada uno de estos componentes de los rodamientos se puede identificar que parte o zona del rodamiento está deteriorada, estas frecuencias se determinan con las siguientes formulas (WHITE, 1990-2010).

$$FTF = 0,4 * RPM \quad (1)$$

$$BPFO = 0,4 * N_B * RPM \quad (2)$$

$$BPFI = 0,6 * N_B * RPM \quad (3)$$

$$BSF = 0,23 * N_B * RPM \quad (4)$$

Dónde:

FTF = Frecuencia de paso por defecto en jaula.

BPFO = Frecuencia de paso por defecto en pista externa.

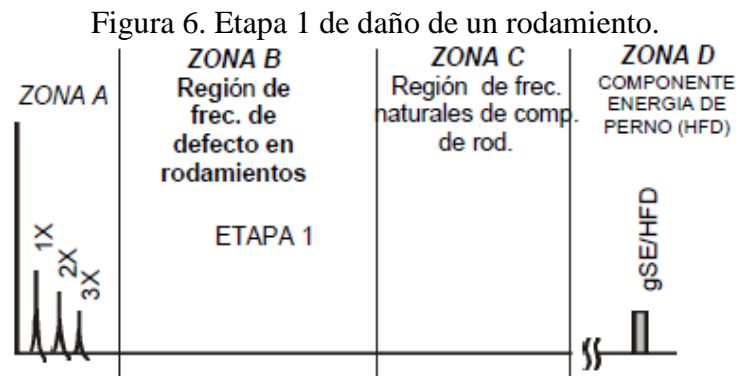
BPFI = Frecuencia de paso por defecto en pista interna.

BSF = Frecuencia de paso por defecto en bola.

N_B = Numero de bolas.

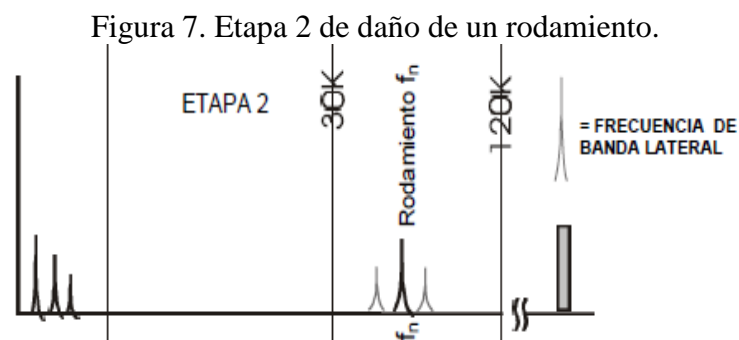
2.1.9 Etapas de falla en un rodamiento. Existen 4 etapas principales los cuales se pueden distinguir a continuación (CHARLOTTE, 1996):

- Etapa 1. La primeras indicaciones de problemas en los rodamientos aparecen en las frecuencias ultrasónicas que oscilan entre 250 – 350 kHz (1200 - 3600 kCPM) están son frecuencias evaluadas por el filtro Spike Energy [Gse], por HFD[g] y por el pulso de choque [dB]. En este punto hay un aproximado entre un 10% a un 20% de vida remanente en el rodamiento.



Fuente: Cartas de Charlotte

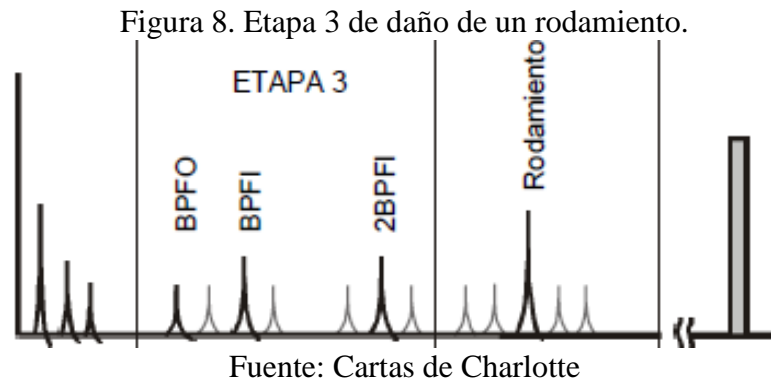
- Etapa 2. Los defectos ligeros del rodamiento comienzan a “excitar” las frecuencias naturales (f_n) de sus componentes, que generalmente ocurre en un rango de 30–120 Kcpm. Dichas frecuencias naturales también pueden ser resonancias de las estructuras de apoyo del rodamiento. Las frecuencias de bandas aparecen arriba y abajo del pico de frecuencias naturales al final de la etapa 2. En este punto tiene un aproximado de 5% a 10% de vida remanente.



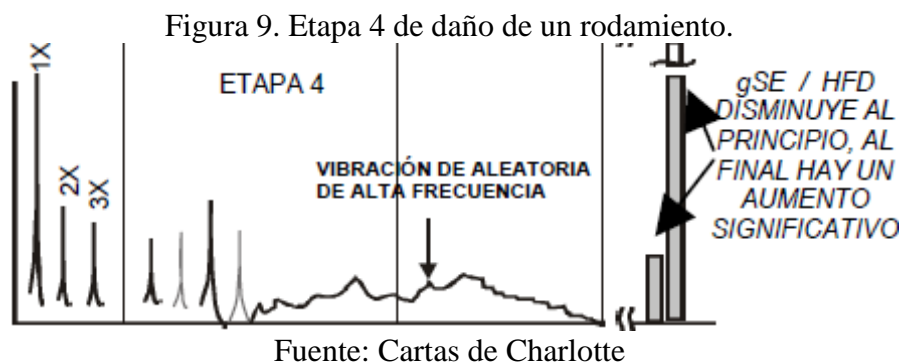
Fuente: Cartas de Charlotte

- Etapa 3. Aparecen armónicas y frecuencias de defectos de rodamiento. A medida que el desgaste progresa, aparecen más armónicas de frecuencias de defecto y el número de bandas laterales crecen, tanto como alrededor de estas y de las frecuencias naturales del componente del cojinete. En esta etapa por lo general el

desgaste es visible y se puede extender a toda la periferia del cojinete, sobre todo cuando varias bandas laterales bien formadas acompañan a las armónicas de frecuencias de defecto de rodamiento. Los espectros demodulados de alta frecuencia y envolventes ayudan a confirmar la etapa 3. Daños en pista interior como exterior son visibles, el incremento de temperatura es aparente. 1% a 5% de vida remanente del rodamiento. ¡*Reemplace los rodamientos ahora!*



- Etapa 4. Hacia el final, incluso se afecta la amplitud 1X rpm. Crece, y normalmente causa el crecimiento de muchas armónicas de 1X. las frecuencias naturales discretas de rodamientos y componentes comienzan a “desaparecer” y se remplazan con “piso de ruido” de alta frecuencia, de banda ancha y aleatoria. Además, las amplitudes tanto del piso de ruido de alta frecuencia y de Spike Energy pueden en efecto disminuir; sin embargo, justo previo al paro catastrófico, la Spike Energy y HFD por lo general crecen a amplitudes excesivas, la temperatura se eleva de manera rápida. Vida remanente entre 1 hora a 1%, En esta etapa existe presencia de vibraciones y el ruido es evidente, de tal manera que su temperatura tiende a incrementar y se debe realizar el cambio inmediato.



2.2 Factores que causan las fallas en rodamientos.

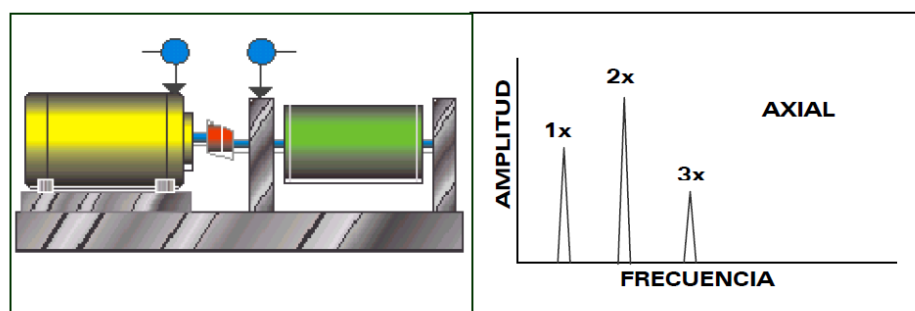
La falla de un rodamiento se puede producir por muchas razones, como el hecho de soportar desalineaciones por motivo de montaje de equipos, el empleo de obturaciones ineficaces o ajustes demasiados apretados que originan un juego interno demasiado pequeño del rodamiento, sobrecarga, desbalanceo, pata coja, desalineación, contaminación, etc. Cada uno de estos factores produce un tipo de daño y deja una huella única en el rodamiento. Por consiguiente, examinado el rodamiento dañado se podría determinar la causa del daño y en base a esto, tomar acciones preventivas que eviten su repetición.

2.2.1 Desalineamiento. Existen tres tipos de desalineación más comunes la paralela, angular y entre chumaceras (A-MAQ, 2005).

Desalineación paralela. Este tipo de problema se produce cuando el eje motriz y el conducido no tienen la misma línea de centro, es decir: no son paralelos como se muestra en la (Figura 10).

La cimentación desnivelada son algunos de los factores que pueden producir el desalineamiento.

Figura 10. Desalineamiento paralelo.

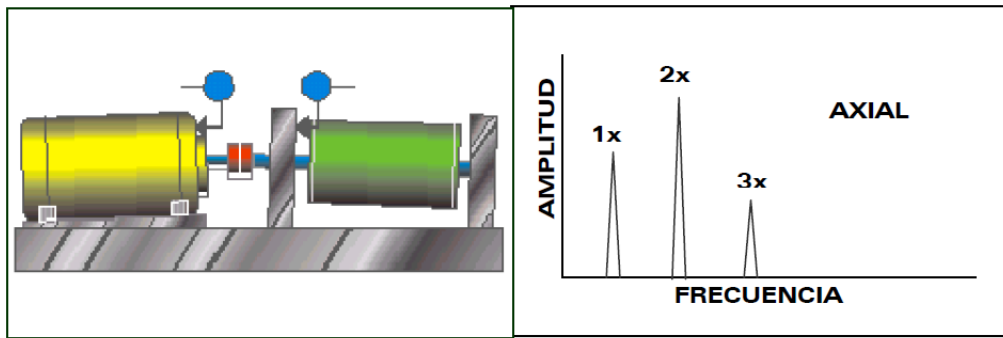


Fuente: A-MAQ S.A, Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico

Desalineación angular. Es cuando el eje del motor y el eje conducido unidos en el acople, no son paralelos como se muestra en la (Figura 11).

El espectro característico frecuencia vs amplitud de todas estas desalineaciones son tomadas en un plano axial.

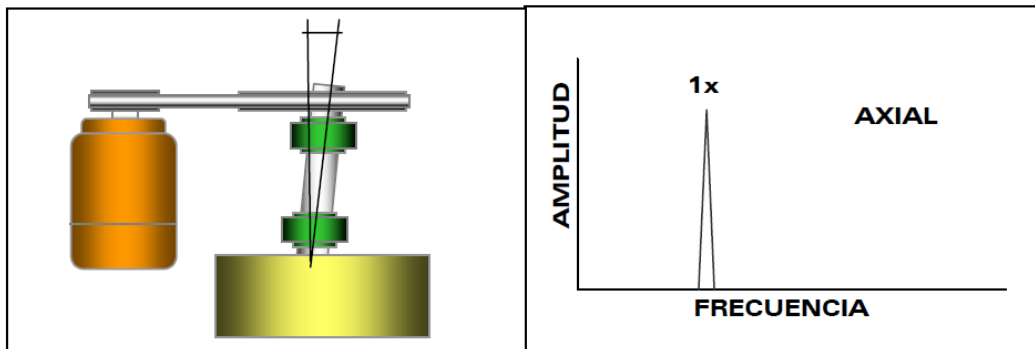
Figura 11. Desalineación angular.



Fuente: A-MAQ S.A, Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico

Desalineación entre chumaceras. En una maquina por medio de poleas, la mala posición de las chumaceras pueden evitar que el eje se acomode correctamente.

Figura 12. Desalineación entre chumaceras.



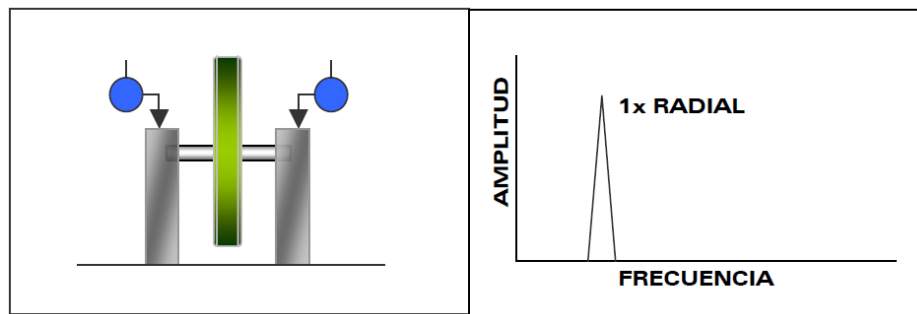
Fuente: A-MAQ S.A, Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico

2.2.2 Desbalanceo. El desbalanceo es una condición que se produce cuando no existe una distribución uniforme de la masa alrededor del centro de giro del rotor o cuando el peso del rotor flexiona al eje que lo soporta.

Estas dos causas de desbalanceo provocan que el centro de gravedad del rotor no coincida con su centro de rotación, permitiendo con ello, la generación de fuerzas y momentos de inercia indeseables sobre los rodamientos. A continuación se muestran los tres tipos de desbalance: el desbalance Estático, desbalance Dinámico y de rotor colgante (A-MAQ, 2005).

Desbalance estático. Esta condición se presenta cuando el eje longitudinal principal de inercia del rotor esta desplazado paralelamente con respecto al eje de rotación tomada en un plano axial.

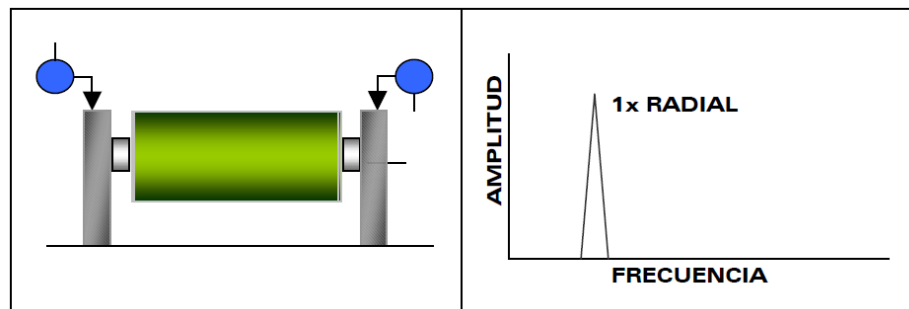
Figura 13. Desbalance estático



Fuente: A-MAQ S.A, Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico

Desbalance dinámico. Se presenta cuando el eje longitudinal principal de inercia del rotor no intercepta al eje de rotación y tampoco es paralelo a éste.

Figura 14. Desbalanceo dinámico.

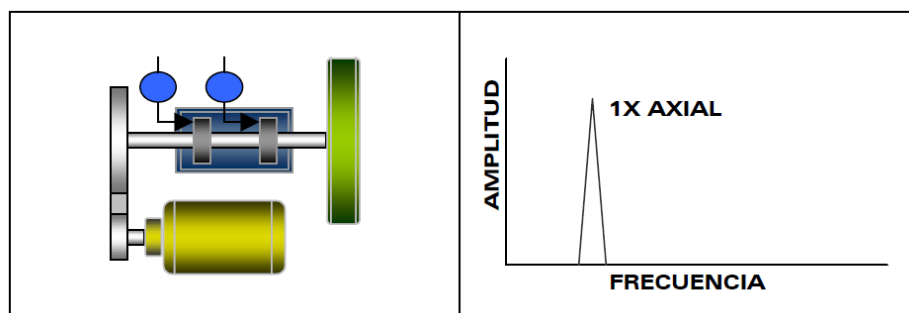


Fuente: A-MAQ S.A, Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico

Desbalance por rotor colgante. Este tipo de desbalanceo ocurre en rotores que se encuentran en el extremo de un eje. Es producido por desgaste en la superficie del rotor y doblamiento del eje.

Su espectro de frecuencia vs tiempo es tomado en el plano axial.

Figura 15. Desbalanceo por rotor colgante.



Fuente: A-MAQ S.A, Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico

2.2.3 Contaminación. La contaminación por partículas externas puede provocar problemas en el correcto funcionamiento de los rodamientos.

Figura 16. Rodamiento contaminado por partículas externas.



Fuente: https://www.google.com.ec/?gws_rd=ssl#q=rodamiento+contaminado

El polvo, suciedad o todo tipo de partículas externas pueden afectar a la lubricación de los rodamientos.

El agua es un agente contaminante particular; una cantidad del 1% de agua en la grasa o aceite puede significar la reducción de vida útil del agente lubricante.

La humedad y la contaminación de agua producen un ataque químico y corrosión en los rodamientos.

2.2.4 Una lubricación inadecuada. Una lubricación inadecuada es el principal motivo por el que un rodamiento se fatigue de forma rápida.

Figura 17. Rodamiento dañado por una inadecuada lubricación.



Fuente: https://www.google.com.ec/?gws_rd=ssl#q=Rodamiento+da%C3%B1ado+por+una+inadecuada+lubricaci%C3%B3n

La lubricación inadecuada puede ser por: sobrellenado, llenado insuficiente, especificación incorrecta, mezcla de varios lubricantes, incompatibilidad, incorrecta lubricación e irregularidades en los intervalos de sustitución (rodamientos de agujas, semi-cojinetes cigüeñal), deterioro de la grasa o aceite, agua y partículas contaminantes.

El fabricante ha de ser capaz de seleccionar el tipo de lubricante en función del rodamiento y del uso al que se va a destinar.

Los daños producidos por una lubricación pobre pueden tener los siguientes síntomas:

- a) *Decoloración u oscurecimiento*: este aspecto del rodamiento es debido al contacto de metal-metal a altas temperaturas. En casos leves el descoloramiento en las pistas y en los rodillos es común, al tratarse de superficies de contacto entre sí. En casos extremos, el calor descolora el propio metal.

Figura 18. Decoloración del rodamiento por falta de lubricación.



Fuente: <http://4.bp.blogspot.com>

- b) *Rayadas*: es un inicio de un serio problema de lubricación, ya sea por una falta de lubricación o por una temperatura excesiva a la cual el lubricante no puede mantener la película lubricante.

Estas rayadas tienen aspectos como de corte del metal.

En ambos casos se requiere atención inmediata para que la vida útil del rodamiento no disminuya, evitando problemas tempranos en los elementos y su consecuencia no sea el paros imprevistos del proceso productivos generando pérdidas económicas.

Figura 19. Degradación del rodamiento con desprendimiento de material.



Fuente: <http://2.bp.blogspot.com>

El calor provocado por altas temperaturas localizado en un punto determinado, puede provocar además una deformación de la geometría del rodamiento, lo que deviene en rodillos asimétricos una destrucción de la jaula, una transferencia de metal, pérdida de par y potencia y un contacto del rodamiento inadecuado así llevando a un paro imprevisto de los equipo en los cuales se encuentran montados los rodamientos.

2.2.5 Sobrecarga. La sobrecarga en los rodamientos puede ser provocada por exceso de carga, una velocidad excesiva de giro, temperatura elevada, funcionamiento incorrecto o desajuste. Cuanto mayor sea esta sobrecarga más se acorta la vida útil del rodamiento.

Figura 20. Rodamiento dañado por sobrecarga.



Fuente: <http://3.bp.blogspot.com>

El rodamiento debe ser sustituido siempre que se detecte algún síntoma de sobrecarga, es cuando se sobrepasa los valores específicos para lo cual fue diseñado un rodamiento llevándonos a un cambio inmediato con el fin de evitar serios daños posteriores (fracturas en los propios rodamientos o en sus guías, deformación y rayadas) y pérdidas económicas considerables para la industria.

2.2.6 Incorrecta manipulación e instalación. Los técnicos deben conocer los métodos adecuados para la instalación de rodamiento así como disponer de las herramientas necesarias.

Otro daño prematuro en el rodamiento puede ser provocado por un incorrecto almacenamiento. Antes de realizar su instalación, el técnico debe asegurarse de que el rodamiento suministrado debe estar en un embalaje anticorrosivo y en buen estado.

Durante la instalación, el técnico debe tener limpias todas sus herramientas. La capa de lubricante que dispone el rodamiento suministrado debe mantenerse, no debe eliminarse.

Figura 21. Daño por causa de un inadecuado montaje.



Fuente: <http://3.bp.blogspot.com>

Una mala manipulación o el uso de herramientas inadecuadas pueden provocar una/s rebaba/s cuyo efecto es un asiento incorrecto, lo que puede aumentar la tensión de contacto en un punto determinado, acortando la vida útil del rodamiento de forma exponencial, al estar sometido a una carga irregular, a un incremento del par e incluso a una temperatura excesiva.

No hay que olvidar que muchos rodamientos son fabricados de acero, bronce o latón, por lo tanto podría dañarse fácilmente sin una correcta manipulación.

2.3 Efecto de fallas en rodamientos.

La vida de un rodamiento se puede ver gravemente afectada debido a los efectos de falla

que se pueden producir en estos elementos dichos efectos de falla pueden ser los siguientes:

- Incremento del ruido.
- Vibraciones.
- Aumento anormal de temperaturas.
- Virutas metálicas.
- Una disminución de su rendimiento.
- Desgaste.
- Fatiga.
- Corrosión.
- Fractura.

2.4 Prevención de fallas en rodamientos.

Los daños en rodamientos causados durante su manejo antes o durante su instalación, además de los deterioros a causa del montaje, ajuste y condiciones de servicios indebidos, son las causantes de la mayoría de las fallas prematuras presentes en rodamientos. Muchos son los casos en los cuales el daño se identifica fácilmente fijándose en el aspecto del rodamiento, pero esto no es tan sencillo y en algunos casos no es posible determinar cuál es la causa exacta del fallo. Frecuentemente será necesario hacer una completa investigación de los procesos de montaje, lubricación y piezas anexas que afectan al servicio del rodamiento para de esta manera determinar el origen del fallo. En el caso de no encontrar y corregir la verdadera causa de la falla, los rodamientos nuevos que se instale se dañaran de la misma manera y se repetirá el daño prematuramente. Es más fácil y mucho menos costoso prevenir fallos, que determinar y corregir su causa luego de que la maquina o equipo está ya en funcionamiento.

2.5 Inspecciones de rodamientos por análisis de vibraciones.

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

Para aplicarla de forma efectiva y obtener conclusiones representativas y validas es necesario conocer determinados datos de la maquina como son la velocidad de giro, el tipo de cojinetes, de correas, números de alabes y de palos, etc., y elegir los puntos adecuados de medida. También es necesario seleccionar el analizador más adecuados a los equipos existentes en la planta (GARRIDO, 2009).

Antes de realizar un análisis de vibraciones se debe tener en cuenta el conocimiento de algunos temas como.

- Transformación rápida de Fourier (FFT).
- Espectro.
- Envolvente de vibración.
- Filtro.
- Spike de energía.
- Magnitudes de la vibración.

2.5.1.1 Transformada rápida de Fourier. La transformada rápida de Fourier (FFT del inglés fast fourier transform) es uno de los mayores desarrollos en la tecnología en una amplia variedad de aplicaciones como son, el tratamiento digital de señales, filtrado digital, resolución de ecuaciones diferenciales, etc. El algoritmo pone algunos límites en la señal en el espectro resultante.

2.5.1.2 Espectro. El espectro de vibraciones es el resultado de transformar la señal del dominio del tiempo en el dominio de la frecuencia. Es la descomposición de la señal de tiempo en una colección de ondas senoidales.

Espectro base. Es un espectro de vibraciones de una máquina que se encuentra en buen estado de funcionamiento de una maquina la cual se encuentra presente en cualquier tipo de industria.

El espectro base puede ser un promedio de espectros de varias máquinas con las mismas características, también es conocido como espectro de referencia, y se usa como una base de comparación con otros espectros recopilados con la maquina en operación y determinar el estado en el que se encuentra.

Espectro línea. Es un espectro en el cual está concentrada la energía en varias frecuencias, opuesto a un espectro continuo, donde la frecuencia está repartida en una banda de frecuencias.

2.5.1.3 *Envolvente de aceleración.* Al empezar en el mundo de las vibraciones en rodamientos se conoce que tales vibraciones en general son de muy baja energía y alta frecuencia, razón por la cual la aceleración de las vibraciones es el mejor parámetro síntoma para la evolución del estado técnico de tales componentes.

La de modulación en amplitud como también se le conoce al análisis de envolvente es una técnica de procesamiento de señales muy conocida en el campo de la electrónica y las telecomunicaciones y comenzó a ser utilizada en los años 80 para evaluar el estado de rodamientos en primera estancia, habiéndose extendido con posterioridad, al análisis de las vibraciones en transmisiones por engranaje.

El análisis de envolvente presupone la selección del rango de frecuencias donde se produce la modulación en amplitud, de filtrado pasa-banda de este, la extracción de la señal de envolvente y el análisis posterior de esta vía FFT (MARIN, 2005).

2.5.1.4 *Filtro.* En el trabajo con Peakvue se hace necesario utilizar filtros, específicamente con filtros pasa alto.

La misión del filtro pasa alto es eliminar las frecuencias bajas del espectro para dedicarse a estudiar solo las altas frecuencias, que es lo que interesa en el estudio de fallas incipiente.

Con la eliminación de la frecuencias bajas del espectro se elimina también información del estado general de la máquina, como por ejemplo un desbalanceo o un desalineamiento, por lo que aquí se presenta el primer punto que vale la pena profundizar ya que Peakvue es una técnica específicamente para determinar desperfectos muy incipientes en los rodamientos y engranes por lo que solo la implementación de esta técnica no basta para hacer un buen mantenimiento predictivo. Peakvue es un excelente complemento a un programa de mantenimiento ya que, como

se ha explicado anteriormente, al detectar el desperfecto de forma incipiente otorga el tiempo necesario a la planificación y ejecución del mantenimiento.

2.5.1.5 Severidad de vibración. Un punto importante a la hora de hablar de vibraciones es conocer la severidad de vibración, ella indica la gravedad que pueda tener un defecto.

La amplitud de la vibración expresa la gravedad del problema, pero es difícil establecer valores límites de la vibración que detecten un fallo.

La finalidad del análisis de vibraciones es encontrar un aviso con suficiente tiempo para poder analizar causas y forma de resolver el problema ocasionando el paro mínimo posible en la máquina.

2.5.1.6 Spike de energía. Son métodos para medir energía ultrasónica., han sido diseñados para detectar causas de vibraciones que exciten la frecuencia natural de los sensores mismos.

Se define “Spikes” o destellos de energía, con la energía vibratoria generada en cortos instantes de tiempo por impactos metal/metal o vibraciones aleatorias que se propagan a través de la estructura.

Los elementos rodantes cuando pasan por un defecto en alguna de sus pistas generan impactos intermitentes que excitan las frecuencias naturales de los diferentes componentes de los rodamientos, un conjunto de estas frecuencias naturales está concentrado en el rango de aproximadamente 1000 a 3000 Hz (60 a 180 KCPM) y pueden ser detectados por las mediciones comunes de vibraciones. Otro conjunto de frecuencias naturales se encuentra cerca de las frecuencias naturales de los acelerómetros usado en el spikes de energía (30 a 32 KHz). Por consiguiente, cuando se inicia una falla incipiente, los elementos rodantes generan ondas cuando pasan a través de ellas, las cuales a la vez excitan las frecuencias naturales de los transductores.

2.5.1.7 Tipos de vibraciones. Existen dos tipos principales de vibraciones las cuales son causadas por diferente motivo como son:

a) *Vibración libre*. Causada por un sistema que vibra debido a una excitación instantánea.

b) *Vibración forzada*. Causada por un sistema que vibra debido a una excitación constante de las causas que generan dicha vibración.

A continuación detallamos las razones más habituales por las que una máquina o elemento de la misma puede llegar a vibrar:

- Desequilibrio
- Desalineamiento
- Excentricidad
- Defectos en rodamientos y/o cojinetes
- Defectos en engranajes
- Defectos en correas
- Holguras
- Falta de lubricación

2.5.1.8 *Magnitudes de las vibraciones.*

- *Desplazamiento*. Se mide generalmente en mils [milésimos de pulgada]. El desplazamiento determina la magnitud de la vibración (WHITE, 1990-2010).

- *Velocidad*. Generalmente se mide en $[plg/s]$ y la convención es de usar el valor pico. La velocidad tiene un avance sobre el desplazamiento en un ángulo de 90° de fase y determina la severidad de la vibración (WHITE, 1990-2010).

- *Aceleración*. Se mide generalmente en [Gs]. 1G es la aceleración debido a la gravedad en la superficie de la tierra, el G en realidad no es una unidad de aceleración, es sencillamente una cantidad de aceleración a que estamos sometidos como habitantes de la tierra, la aceleración tiene un avance sobre la velocidad en un ángulo de 90° de fase y determina la magnitud de la fuerza de vibración (WHITE, 1990-2010).

2.5.2 Inspección de Rodamientos por vibraciones. Los rodamientos son elementos muy importantes en las máquinas y su fallo puede dar problemas graves, por esta razón es necesario tener un cuidado muy especial con ellos. Es por esta razón que el análisis de vibraciones es una técnica, que aunque no exacta, es capaz de encontrar fallos en máquinas anticipándose a la avería, las ventajas de realizar este tipo de inspecciones son la desaparición de fallos repentinos en máquinas, además del conocimiento del estado técnico de la maquina en cada momento, de esta manera se puede disminuir los costes económicos por reparaciones imprevistas, paros en procesos de producción, cambios que aún pueden seguir funcionando, incremento en la eficiencia y decremento de costes de una parada, además nos ayudan a mejorar el mantenimiento preventivo a realizar en la fábrica.

2.6 Inspecciones de rodamientos por ultrasonido pasivo.

2.6.1 Ultrasonido Pasivo. El análisis de ultrasonido estudia las ondas de sonido de alta frecuencia producidas por determinados equipos e instalaciones y que no son audibles por estar fuera del rango de captación del oído humano 20 a 20000 Hz. El análisis y la detección de estos equipos de alta frecuencia permiten, entre otras cosas (GARRIDO, 2009):

Los ultrasonidos permiten detectar:

- Detección de fricción en máquinas rotativas.
- Detección de fallas y/o fugas en válvulas.
- Detección de fugas de fluidos.
- Pérdidas de vacío.
- Detección de "arco eléctrico".
- Verificación de la integridad de juntas de recintos estancos.

Esta tecnología se basa en que casi todas las fricciones mecánicas, arcos eléctricos y fugas de presión o vacío producen ultrasonido en frecuencias cercanas a los 40 KHz, y de unas características que lo hacen muy interesante para su aplicación en mantenimiento predictivo: las ondas sonoras son de corta longitud atenuándose rápidamente sin producir rebotes. Por esta razón, el ruido ambiental por más fuerte que

este sea, no interfiere en la detección del ultrasonido. Además, la alta direccionalidad del ultrasonido en 40 kHz permite con rapidez y precisión la ubicación del fallo.

2.6.1.1 Principio físico. El sonido está conformado por un conjunto de ondas mecánicas longitudinales producida por la vibración de componentes y propagadas a través de un medio elástico.

Este tipo de ondas pueden estimular el oído humano y generar una sensación sonora, las características de una onda de sonido son:

- *Ciclo.* Es el movimiento completo de la onda.
- *Longitud.* Es la distancia necesaria para para completar un ciclo. Por lo general se denota como λ .
- *Amplitud.* Es el valor máximo en sentido positivo y negativo que alcanza la onda sonora.
- *Frecuencia.* Es el número de ciclos por unidad de tiempo.

2.6.1.2 Severidad del sonido. Unas ves definido la línea de referencia con decibeles en perfecto estado de funcionamiento, la siguiente tabla nos muestra el incremento de la amplitud en decibeles como severidad máxima referencial a partir de los 8 dB, proporcionada por los fabricantes del equipo para realizar un análisis de comportamiento y su acción para ejecutar su mantenimiento.

Tabla 1. Severidad del sonido.

Modos de falla del rodamiento	Decibeles sobre la referencia [dB]	Acción
Pre-falla o falta de lubricación	8-10	Lubricar y retomar las lecturas
Primer síntomas o comienzo de la falla	10-12	Vigilar en el tiempo
Falla	13-16	Programar su reemplazo (próximo período conveniente)
Falla catastrófica	35-50	Remover y reemplazar de inmediato

Fuente: UE System.

2.6.2 *Inspección de Rodamientos por ultrasonido.* Cualquier clase de rodamiento, ya sea nuevo o usado, en buen o mal estado, tiene la capacidad de emitir ondas de ultrasonido producidas por la fricción entre las partes del elemento, por medio del análisis de ultrasonido se puede determinar el estado actual del elemento y a su vez identificar si existe o no algún problema.

CAPÍTULO III

3. DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBA

El diseño del banco de pruebas se basa en un análisis general, todos los pasos a seguir se estableció en este capítulo, en parámetros de diseño se encuentran las ecuaciones para la selección de cada partes y piezas que necesite el módulo de inserción de fallas incipientes en los rodamientos.

3.1 Sistemas del banco de pruebas.

Antes de detallar cada elemento usado en el banco de pruebas en el diagnóstico de fallas incipientes en rodamientos, se considera la siguiente lista de requerimientos para nuestro diseño del banco de pruebas el cual ayuda a simular una falla incipiente por medio de una desalineación angular controlada.

Tabla 2. Lista de requerimientos

Descripción	Cantidad
Motor eléctrico trifásico de 1/2 Hp, marca WEG, modelo TE1BF	1
Eje de acero inoxidable AISI 304	2
Acople flexible Love-Joy, L. 075	1
Chumacera de la marca CMB con designación HCP204 de la serie HC204	3
Rodamiento de bola de ranura profunda 6204-RS	1
Polea 2,5 y 5 pulgadas	2
Correa en V de perfil AP24 pulgadas	1
Grasa NLGI 3	1
Arrancador de 3 Amperios	1
Placa base	1

Fuente: Autores

El banco de pruebas se clasifica en los siguientes sistemas: de potencia, transmisión, lubricación y eléctrico, mismos que se detallan a continuación.

3.1.1 Sistema de Potencia. En el sistema de potencia está constituido por un motor eléctrico de ½ Hp, el cual esta seleccionado y especificado sus características más adelante en la unidad de potencia.

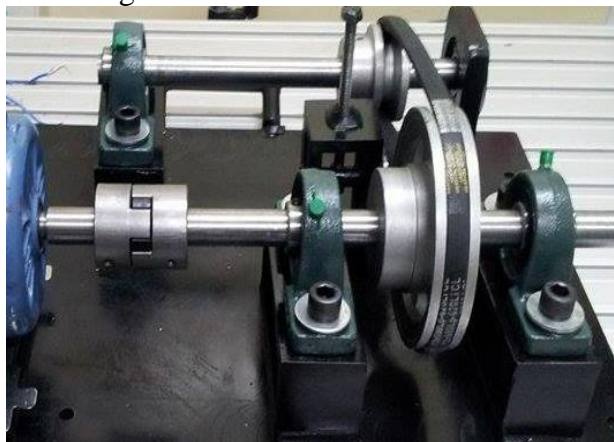
Figura 22. Motor eléctrico trifásico de 1/2 Hp.



Fuente: Autores

3.1.2 *Sistema de Transmisión.* En el sistema de transmisión para nuestro diseño está constituido por: un acople flexible, eje, chumaceras y rodamiento, el cual cumple con las exigencias para nuestra investigación.

Figura 23. Sistema de transmisión.



Fuente: Autores

3.1.3 *Sistema de Lubricación.* En el sistema de lubricación esta seleccionado y escogido adecuadamente con sus especificaciones técnicas, proporcionando características que le hace ideal en el momento de su uso, estos datos son proporcionadas por los fabricantes de los rodamientos.

Para este caso se utilizara una grasa NLGI 3 como se lo indica en la unidad más adelante, la grasa es inyectada a presión en la chumacera por medio del punto de lubricación como se observa en la figura.

Figura 24. Punto de lubricación de chumacera.



Fuente: Autores

3.1.4 Sistema eléctrico. En el sistema eléctrico está constituido por un interruptor de arranque que ayuda a brindar más seguridad al momento de poner en funcionamiento y paro del motor, ya que se puede parar y arrancar con mucha facilidad.

Figura 25. Arrancador.



Fuente: Autores

3.2 Selección del motor.

Se realizó la selección de un motor trifásico de $\frac{1}{2}$ Hp como fuente de movimiento, debido a costo, necesidad, capacidad de la red, potencia mínima que se encuentra en el mercado y por qué este motor satisface las exigencias y parámetros a cumplir en el banco de pruebas.

Además porque no presenta un riesgo mayor para la persona que lo está operando al momento de que el modulo este en funcionamientos para la respectiva toma de datos cumpliendo con todas las exigencias y parámetros de diseño se selecciona esta clase de motor.

Tabla 3. Datos técnicos del motor.

Modelo	TE1BF
Serial	20FEV12
Potencia	½ Hp
Intensidad	2,10/1,22 A
Factor Potencia	0,69
Frecuencia	60 Hz
Velocidad	1680 rpm
Voltaje	220/380 V

Fuente: Placa de Motor

3.3 Selección del sistema de transmisión.

3.3.1 Selección del eje. Se ha seleccionado de acuerdo a los cálculos Par de torsion para transmisión de potencia.

Torque nominal (CARDONA, y otros, 2010)

$$T_n = \frac{60 P}{2\pi n} \quad (5)$$

$$T_n = \frac{60(368)}{2\pi(1875)}$$

$$T_n = 1,87 \text{ N.m}$$

Dónde:

P = potencia del motor en [W]

n=Velocidad de giro de motor

Para ejes de acero: $\tau_y = \tau_{ad} = 20 - 25 \text{ MPa}$

Para eje circular de sección constante el momento torsor está dado por:

$$M_T = \frac{\tau_{adm} x J}{c} \quad (6)$$

Dónde:

τ_{ad} = Esfuerzo admisible [Pa]

C = Radio del eje y punto para el que se define el esfuerzo [mm]

J = Momento polar de inercia [N]

Por resistencia de materiales se sabe que para los ejes sólidos.

$$J = \frac{1}{2} \pi C^4 \quad (7)$$

Remplazando en la ecuación (6) $\tau_{adm} = \frac{2M\tau}{\pi C^3}$

$$C = \frac{d}{2}$$

Dónde:

d= diámetro

$$\tau_{adm} = \frac{16M\tau}{\pi d^3}$$

Se despeja diámetro de la ecuación y se utiliza el Tn del motor tomando el valor del momento pico, el cual para la mayoría de motores asincrónicos es aproximadamente $2M\tau$ entonces $M\tau = 3.74Nm$

$$d = \sqrt[3]{\frac{16 * M\tau}{\pi * \tau_{adm}}} = \sqrt[3]{\frac{16 * 3,74 N.m * 10^3}{\pi * 20 MPa}} = 9,839 mm$$

Al ser el diámetro previo de 9,839 mm de diámetro se decidió utilizar un acero inoxidable AISI 304 de 20 mm de diámetro ya que este es un acero comercial y nos brinda una mayor resistencia a los esfuerzos cíclicos presentes en el módulo de prueba, estos ejes se encargaran de transmitir un momento de giro, cuenta con dos chumaceras como puntos de apoyo y en este se encuentra montado una de las dos poleas del módulo.

Los ejes son de acero inoxidable austenítico, aleado con Cromo y Níquel y bajo contenido de Carbono que presenta una buena resistencia a la corrosión. No es templable ni magnético, como se detalla a continuación estas propiedades hacen que sean utilizados ampliamente en las industrias y por ende cumpla con los requerimientos para el banco de pruebas.

Propiedades Eléctricas

- Resistividad Eléctrica = 70-72 $\mu\text{Ohm.cm}$

Propiedades Físicas

- Densidad = 7,93 g/cm^3
- Punto de Fusión = 1400-1455 $^{\circ}\text{C}$

Propiedades Mecánicas

- Alargamiento < 60 %
- Dureza Brinell = 160-190 HB
- Resistencia a la fluencia = 310 MPa
- Módulo de elasticidad = 200 GPa
- Resistencia máxima = 600 MPa

Propiedades Térmicas

- Temperatura máxima de operación servicio continuo 840 $^{\circ}\text{C}$
- Temperatura para inicio de forjado 1200 $^{\circ}\text{C}$

3.3.2 Selección del acople. La selección del acople flexible se lo realizo por las ventajas que ofrece, como son; actúa como amortiguador y aislador de vibraciones, funciona como aislador de la electricidad en cierto casos, nos ayuda a realizar torsiones suaves, no utiliza lubricación, nos facilita realizar acciones de mantenimiento al momento de realizar una alineación de una manera rápida y segura con el fin de cumplir los objetivos de un banco de pruebas didáctico para nuestro estudio.

Calculo para selección acople flexible (<http://www.kc9aop.net>, 2013).

$$T_{acople} = \frac{P * 5252}{rpm} lb. plg \quad (8)$$

$$T_{acople} = \frac{0,5 Hp * 5252}{1875}$$

$$T_{acople} = 1,401 lb. plg$$

Dónde:

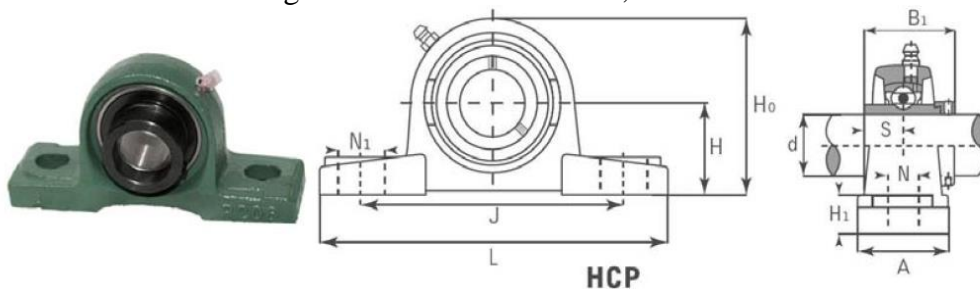
P = potencia del motor en [Hp]

rpm = Velocidad de giro del motor en [RPM]

De acuerdo a las características de la (Tabla 3), el torque del acople calculado y el diámetro del eje, se realizó la selección de un acople flexible Love-Joy, L. 075 el cual cumple con las exigencias que se requiere en nuestro módulo de pruebas.

3.3.3 Selección de las chumaceras. Una vez elegido el diámetro del eje es necesario seleccionar un tipo de chumacera que se acople al sistema del banco de pruebas, cabe mencionar que se debe hacer una selección cuidadosa teniendo en cuenta que va estar sometido a sobrecarga moderada, se ha decidido seleccionar una chumacera de la marca CMB con designación HCP204 de la serie HC204, este modelo es el elegido ya que cumple con el propósito que se requiere para este diseño y ya que el rodamiento de la chumacera es capaz de auto alinearse por sí mismo, para compensar el desalineamiento del eje con respecto del alojamiento ya sea por motivo de un montaje deficiente u otras causas del desalineamiento.

Figura 26. Chumacera CMB, HCP204.



Fuente: Catalogo CMB

Para el banco de pruebas se requiere dos chumaceras las cuales se encuentran acopladas en el eje conductor y una chumacera en el eje conducido en el cual va acoplado con el módulo de inserción de fallas incipientes en rodamientos con las mismas características de funcionamiento, estos elementos son auto alineables evitando desalineación entre chumaceras y no ver espectros distorsionados por este factor al momento de la toma y análisis de estos.

Esto quiere decir que se utilizara tres chumaceras en todo nuestro diseño, con características iguales en forma, tamaño y peso, como se muestra a continuación.

Tabla 4. Características de Chumacera CMB, HCP204.

Part No.	Dimensión												Masa [kg]
	d	H	L	J	A	N	N1	H1	H0	B	S	Bolt.	
HCP204	20	33,3	127	95	38	13	19	14	65	43,7	17,1	M10	0,73

Fuente: Catalogo CMB

3.3.4 Selección de poleas. La selección de las poleas fue de acuerdo al tipo de banda seleccionada y de la velocidad de giro que se requiere en el eje conducido que se encuentra acoplado al módulo de prueba, ya que se requiere mayor velocidad para llevar al daño al rodamiento, ya que a mayor velocidad reduce la vida útil del rodamiento.

La relación de transmisión es de 1 a 2, en la cual se ha seleccionado una polea de 5 plg, que se encuentra montada en el eje conductor el cual está girando a 1875 rpm ya que se encuentra acoplado al motor, la segunda polea es de 2.5 plg, la cual se encuentra montada en el eje conducido y por la relación de transmisión gira a 3750 rpm así incrementando la velocidad de giro y llevando al daño del rodamiento para nuestro fin.

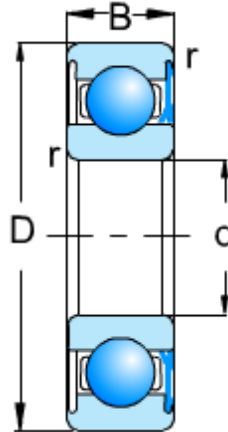
3.3.5 Selección de banda. Se ha seleccionado una transmisión por banda con polea tensor exterior ya que es una forma más sencilla de transmitir potencia y más utilizado comúnmente en el ámbito de la industria, es una correa en V de perfil AP24 pulgadas, unas de las más conocidas, tiene doble cubierta está impregnada con neopreno (caucho), por sus propiedades que compone este tipo de banda soporta el calor y aceites, el cual incrementa la vida útil del elemento.

Este tipo de correa Super Blue Ribbon está en la capacidad de resistir la fatiga por flexión, y puede soportar mayor carga, por tal motivo este tipo de banda es la elección correcta para un rendimiento confiable y económico en nuestro módulo de pruebas.

3.4 Selección de rodamiento.

Se seleccionó un Rodamiento de Bola de Ranura Profunda de hilera sencilla, es capaz de soportar altas velocidades, es uno de los elementos que son ampliamente utilizados en rodamientos radiales, este tipo de rodamientos pueden soportar cargas axiales muy pesadas luego de incrementar la tolerancia radial.

Figura 27. Rodamiento de bola de ranura profunda 6204-RS.



Fuente: Catalogo CMB

Para este módulo se requiere un solo rodamiento, el cual se encuentra montado en el módulo de pruebas, igual que las chumaceras es de la misma marca y con particularidades similares y posee unas características que lo hace ideal para nuestra selección a continuación se detalla datos específicos de este rodamiento.

Tabla 5. Característica del rodamiento.

Dimensiones [mm]				Rango de carga básica [kN]		Velocidades Limite [RPM]	Masa [kg]	Número de rod.
d	D	B	r _s min.	Cr	Cor	Grasa	(aproximadamente)	KML
20	47	14	1	12.8	6.65	18 000	0,106	6204-RS

Fuente: Catalogo CMB

3.5 Sistema de lubricación.

3.5.1 Selección del sistema de lubricación. Los elementos utilizados en el banco de pruebas como (chumaceras y rodamientos), son lubricados (engrasados) de forma manual cada cierta frecuencia, esto depende de las horas de uso y de las condiciones a las cuales estén operando, es por esta razón que para la lubricación de estos elementos se utiliza un sistema de lubricación manual, el lubricante a utilizar en rodamientos y chumaceras es una grasa NLGI 3.

Entre sus características se puede citar una excelente estabilidad térmica, estabilidad mecánica, excelente resistencia al agua y propiedades antioxidantes, teniendo en cuenta que va estar sometido a temperatura considerable hace de este el adecuado en la selección del lubricante para el módulo de prueba.

Tabla 6. Propiedades de la grasa NLGI 3.

Tipo de grasa	NLGI 3
Tipo de jabón	Litio
Viscosidad del aceite base	40 °C mm ² /s;120 100 °C mm ² /s;12
Punto de goteo	>180 °C (>355 °F)

Fuente: Catalogo CMB

3.6 Sistema eléctrico.

Para la selección del arrancador se realiza en base al voltaje y la potencia, para así obtener la intensidad.

Intensidad de elemento de maniobra (DONATE, 2010) .

$$I_{arranque} = \frac{W}{V} \quad (9)$$

Dónde:

V = Voltaje [V]

P= Potencia del motor en [W]

$$I_{arranque} = \frac{373}{220} = 1,7A$$

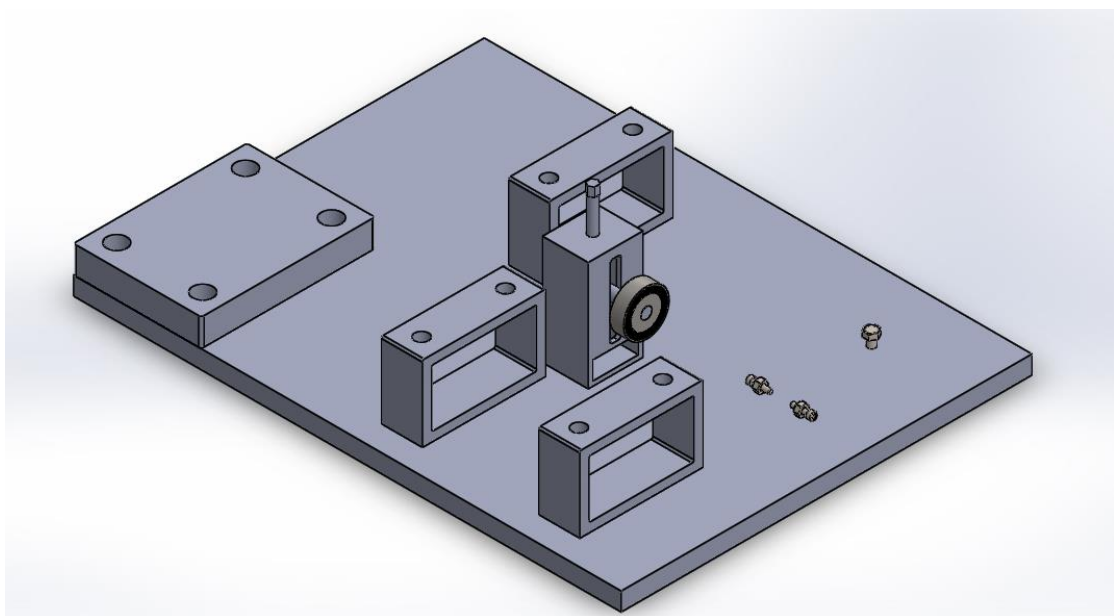
Con una corriente calculada de 1.7 Amperios, se realiza la selección del arrancador en base a nuestra necesidad, seleccionando un arrancador de 3 Amperios, ya que en su característica es el que más se aproxima a nuestra necesidad y se encuentra por arriba del valor de corriente de arranque calculado.

Para la selección de calibre de conductor se establece de acuerdo al consumo de corriente y al amperaje que soporta, se eligió un tipo de conductor de cordón el cual consiste en tres alambres aislados y envueltos juntos con una segunda capa de plástico y una medida de calibre de conductor 12 AWG con un amperaje soportado de 20 A, hasta temperaturas de 90°C, resistente al agua y con baja emisión de humo.

3.7 Diseño de la estructura del banco de pruebas.

Se construye toda la base del módulo de pruebas el cual va ir montado el motor, las chumaceras y el módulo de inserción, teniendo en cuenta que existe un sistema que nos ayudara a templar las bandas por medio de un tornillo para ayustar y un rodamiento que es de ayuda para reducir la fricción de la banda en el punto de contacto del templador, el cual se encuentra soldado en la placa base para así dar el temple adecuado y el modulo funcione en perfectas condiciones.

Figura 28. Estructura del banco de pruebas.



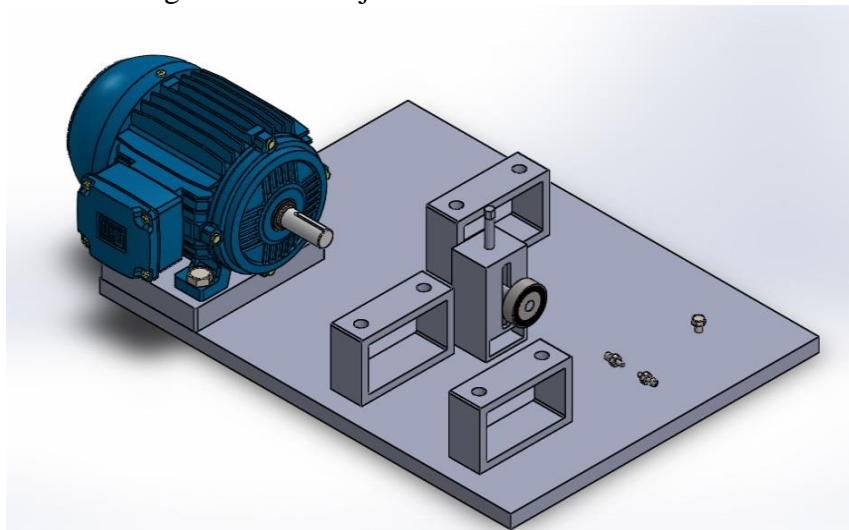
Fuente: Autores

3.8 Montaje del banco de pruebas.

Para el montaje del banco de pruebas para el análisis de vibraciones y ultrasonido pasivo se realiza por pasos detallados a continuación.

1. *Montaje de motor.* En la (Figura 29) se observa el motor ensamblado a la placa base del módulo.

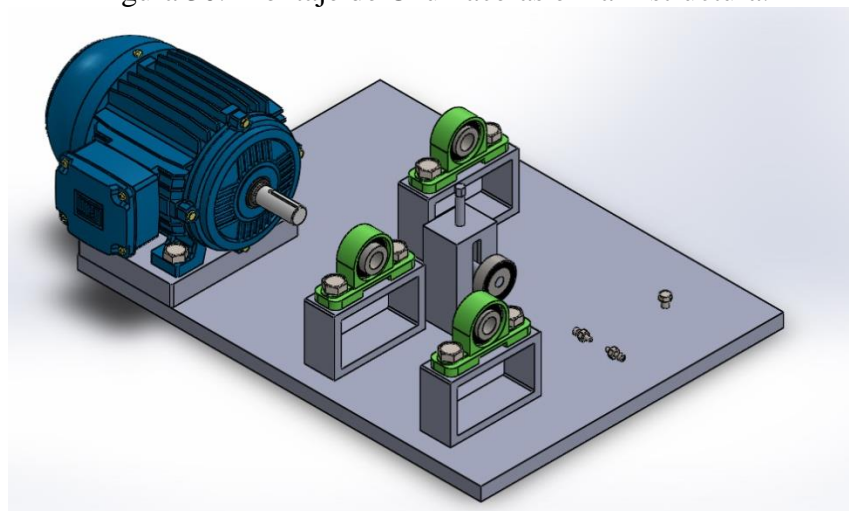
Figura 29. Montaje de Motor en la Estructura.



Fuente: Autores

2. *Montaje de chumaceras en placa base.* En la (Figura 30) se puede observar las chumaceras montadas sobre los soportes anclados a la base

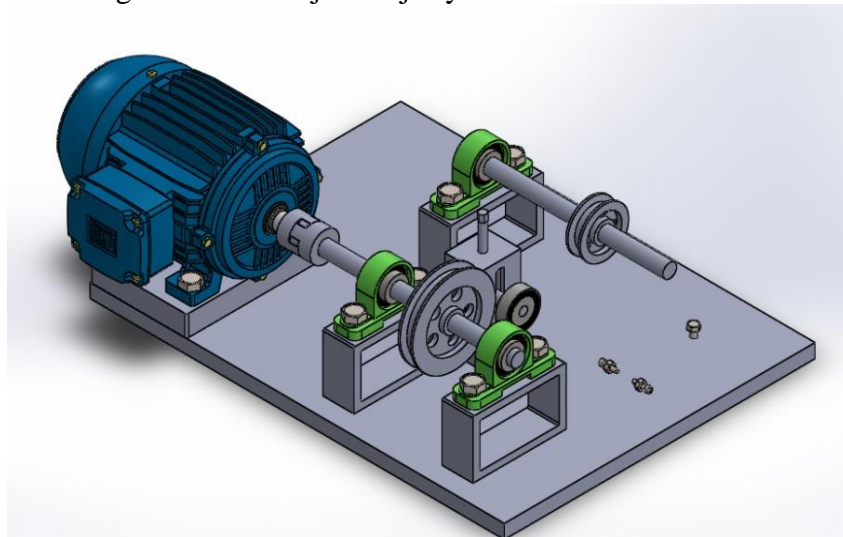
Figura 30. Montaje de Chumaceras en la Estructura.



Fuente: Autores

3. *Montaje de ejes y poleas.* En la (Figura 31). Se observa los ejes ensamblados en las chumaceras, el eje principal esta acoplado al Eje del motor mediante un acople flexible denominado “matrimonio”, eje secundario en uno de sus lados se acoplará al módulo en el cual se simulara desalineación, las poleas se encuentran montadas la de mayor diámetro en el eje principal y la de menor diámetro en el eje secundario.

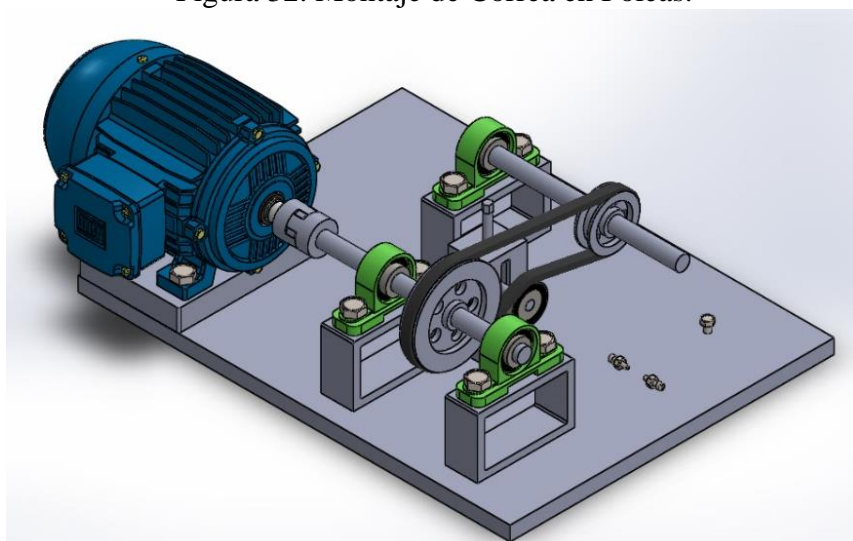
Figura 31. Montaje de Ejes y Poleas en la Estructura.



Fuente: Autores

4. *Montaje de Correa.* En la (Figura 32), se observa el montaje de la correa de transmisión en las poleas, la cual se encargará de transmitir movimiento de rotación del eje principal al eje secundario con una relación de transmisión de 1 a 2.

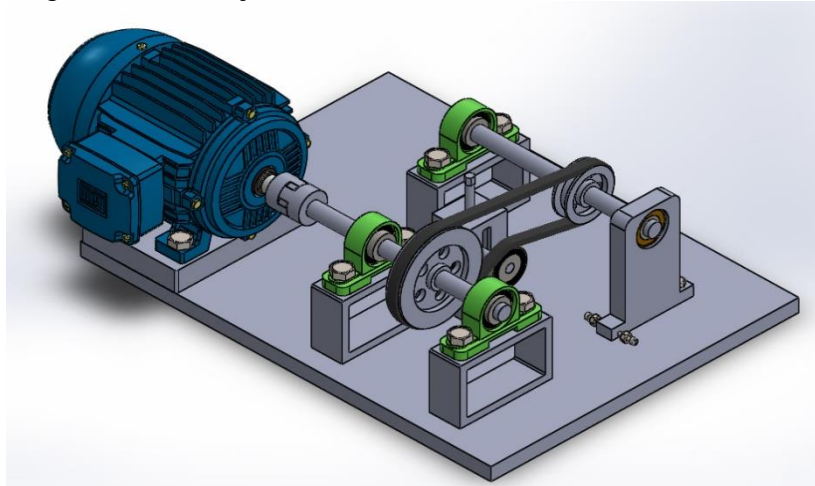
Figura 32. Montaje de Correa en Poleas.



Fuente: Autores

5. *Montaje del Módulo de inserción de desalineación en rodamientos.* En la (Figura 33). Se observa el montaje del módulo de inserción de desalineación en rodamientos, en el cual se va a efectuar los respectivos ensayos para determinar algunos de los objetivos planteados en esta tesis.

Figura 33. Montaje de Modulo de Inserción de Desalineación.



Fuente: Autores

6. *Alineación laser.* Una vez ensamblado las partes se procede a realizar la alineación laser, el cual consiste en el posicionamiento correcto entre ejes, el inadecuado giro entre ejes y su consecuencia de vibración sobre el banco de ensayos producen efectos no deseados en la toma de datos para nuestra investigación.

Figura 34. Alineación laser.



Fuente: Autores

Los efectos pueden ser excesivo ruido, deterioro de las partes entre otros. Por tal manera para evitar otras posibles fallas se realizó la alineación laser en el módulo como se muestra en la (Figura 34).

7. *Alineación de poleas.* Las poleas son elementos que si se ven afectados por la desalineación aunque algunos no lo consideren las consecuencias son el desgaste de poleas, correas, cojinetes y juntas, así como las vibraciones, como resultado de una adecuada alineación incrementa la eficiencia y reduce los gastos por consumo de energía, de tal manera que es importante poner en marcha el banco de pruebas con poleas correctamente alineadas para evitar toma de datos alterados.

Figura 35. Alineación de poleas.



Fuente: Autores

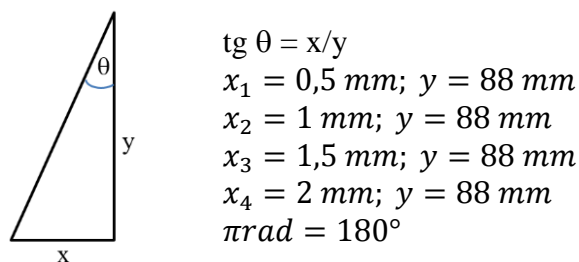
CAPÍTULO IV

4. MEDICIÓN DE VIBRACIONES Y ULTRASONIDO

4.1 Introducción.

4.1.1 Metodología. En este capítulo se presenta la metodología que se usó para la adquisición de datos, tanto de vibraciones como de ultrasonido pasivo. Para esto se utilizó el módulo didáctico (Figura 33). En el cual se procedió a realizar la desalineación angular controlada de 5,2 hasta 22,7 mrad en intervalos de 5,2 mrad durante 4 horas que corresponde al 100% del tiempo total que duro el ensayo. La velocidad de rotación del eje para cálculos de frecuencia es de 3750 rpm. La vibración es medida con el equipo Vibrachek 200 (Figura 38), se usara un acelerómetro para capturar el espectro tanto de posición vertical como de horizontal, también se hace uso de un transductor magnético para la toma de datos de ultrasonido con el equipo Ultraprobe 1500 (Figura 36), en las posiciones radial y axial de acuerdo a la norma (ISO10816-1, 1995).

A continuación se muestra la metodología que se utiliza para calcular la desalineación angular controlada en mrad.



En la figura anterior se puede observar cómo generar una desalineación angular en el módulo de pruebas, sabiendo que el cateto opuesto “x” es el lado en donde variamos por medio de un perno que posee un paso de 1mm, al girar el perno varia el valor de “x” desde (0,5-2)mm, sabiendo que el cateto opuesto “y” es 88mm el cual es igual al módulo de inserción de rodamientos, de esta forma se calcula el ángulo que va adquiriendo al variar el valor de “x” y así adquiriendo datos exactos en mili radianes de desalineación.

4.1.1.1 *Equipo de ultrasonido pasivo ULTRAPROBE 15000.* Es uno de las técnicas que no son muy difundidas en las industrias Ecuatorianas de tal manera que este equipo representa un gran paso adelante en el monitoreo de condición por ultrasonido en plantas de proceso industriales (PETERB, 2008).

Figura 36. Ultraprobe 15000.



Fuente: UE SYSTEM, Manual de Ultraprobe 15000

Características del Equipo

- Tecnología de pantalla táctil de fácil uso.
- Análisis espectral integrado en el equipo (FFT y serie de tiempo).
- Grabación de datos, sonidos e imágenes en tarjeta SD.
- Medición de temperatura con termómetro infrarrojo incorporado.
- Ajuste de emisividad incorporado.
- Cámara digital incorporada.
- Flash integrado.
- Múltiples pantallas de datos, [dB], temperatura, análisis espectral, etc.
- Puntero laser.
- Introducción de rutas de inspección.
- Software DMS ultratend y Spectralyzer incluido.
- Emisor de ultrasonidos.

Software

- Software Ultratrend DMS.
- Software UE Spectralyzer.
- Descarga de datos a través de tarjeta de datos SD.

Accesorios

- SCM módulo escáner.
- Cargador de batería y centro de carga.
- Audífonos.
- Transductor de montura magnética.
- Sonda de enfoque de hule.
- Varillas de extensión STM.
- LRM módulo de largo alcance.
- STM módulo de contacto.
- Empuñadura alojamiento.
- WTG-1 Generador de tono.

Figura 37. Accesorios Ultraprobe 15000.



Fuente: UE SYSTEM, Manual Ultraprobe 15000

Aplicaciones

- Detección de fugas de aire comprimido.
- Inspección de trampas de vapor.
- Localización de fallos eléctricos.
- Localización de fallos en transformadores.
- Arco
- Corona
- Tracking
- Detección de cavitación en bombas.
- Monitoreo de rodamientos y equipos rotativos.
- Falta de lubricación.
- Exceso de lubricación.

4.1.1.2 *Equipo de diagnóstico vibracional VIBRACHEK 200.* El equipo Vibrachek 200 es uno de los equipos que se utiliza en las industrias Ecuatorianas, es un magnifico analizador portable de vibraciones mecánicas de dos canales, diseñado para el análisis de condición de máquinas en procesos industriales (IDEAR, 2012).

Figura 38. Vibrachek 200.



Fuente: IDEAR, Manual Vibrachek 200

Características Principales:

- Dos entradas dinámicas para conectar acelerómetros o sensores de proximidad.
- Medición de aceleración, velocidad, desplazamiento.
- Medición de espectros.
- Formas de ondas y orbitas.
- Protección contra polvo y humedad.

Ventajas del equipo

- Es liviano y fácil de transportar.
- Rápida recolección de mediciones en rutas.
- Realiza mediciones detalladas.
- Capaz de funcionar como colector.
- Alanceador.
- Analizador.

Sensores y accesorios

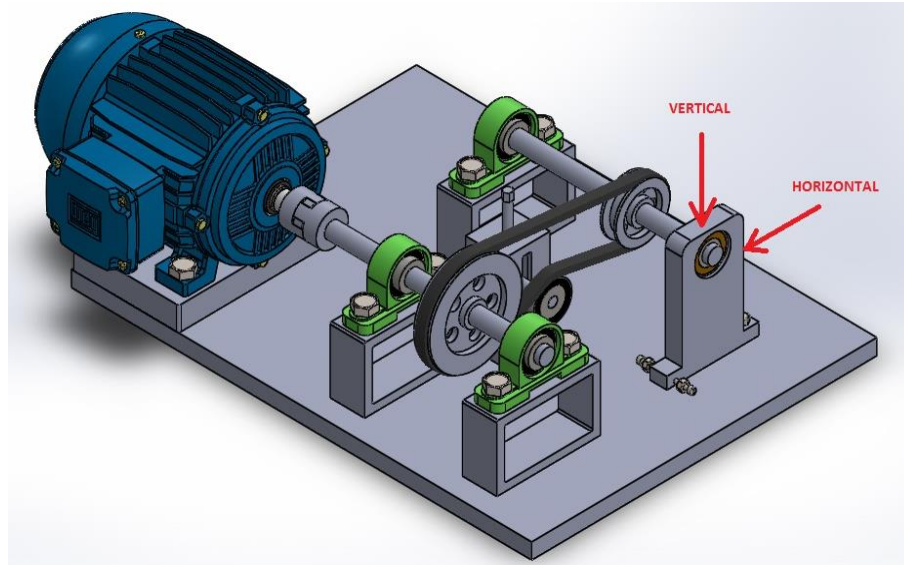
- Sensores de proximidad.
- Sensores de velocidad.
- Acelerómetros.
- Otros sensores con módulos configurables.

Software

- Software MAINtraq
- Descarga y análisis de datos a PC a través de conexión USB.

4.1.2 *Ubicación de puntos.* En la (Figura 39) se presenta el esquema del módulo en el cual se indica la ubicación correcta de los puntos de medición de acuerdo a la norma (ISO 10816-1,1995) para el caso de los rodamientos se toma en cuenta el tipo de carga a soportar para la cual está diseñado el rodamiento como lo indica la norma.

Figura 39. Puntos de medición.



Fuente: Autores

4.1.3 Frecuencias generadas por los rodamientos. Para el cálculo de las frecuencias generadas por los rodamientos se calcula a partir de las fórmulas relativamente simples mencionadas anterior mente.

Las frecuencias generadas por el rodamiento CMB 6204_RS son las que se calcula de acuerdo con las formulas mencionadas que dependen de la velocidad de giro y el número de elementos rodantes, teniendo en cuenta que estos datos son una aproximación con respecto a los datos generados por los equipos, a continuación se muestra las siguientes tablas:

Tabla 7. Frecuencias generadas.

Frecuencia de falla	Frecuencia [Hz]	Frecuencia [CPM]
BPFO	200	12000
BPFI	300	18000
FTF	25	1500
BSF	115	6900

Fuente: Autores

Tabla 8. Armónicos de las frecuencias en [Hz].

	2x	3x	4x	5x	6x	7x	8x	9x	10x
BPFO	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
BPFI	600	900	1200	1500	1800	2100	2400	2700	3000
FTF	50	75	100	125	150	175	200	225	250
BSF	230	345	460	575	690	805	920	1035	1150

Fuente: Autores

Tabla 9. Armónicos de las frecuencias en [cpm].

	2x	3x	4x	5x	6x	7x	8x	9x	10x
BPFO	24 000	36 000	48 000	60 000	72 000	84 000	96 000	108 000	120 000
BPMF	36 000	54 000	72 000	90 000	108 000	126 000	144 000	162 000	180 000
FTF	3 000	4 500	6 000	7 500	9 000	10 500	12 000	13 500	15 000
BSF	13 800	20 700	27 600	34 500	41 400	48 300	55 200	62 100	69 000

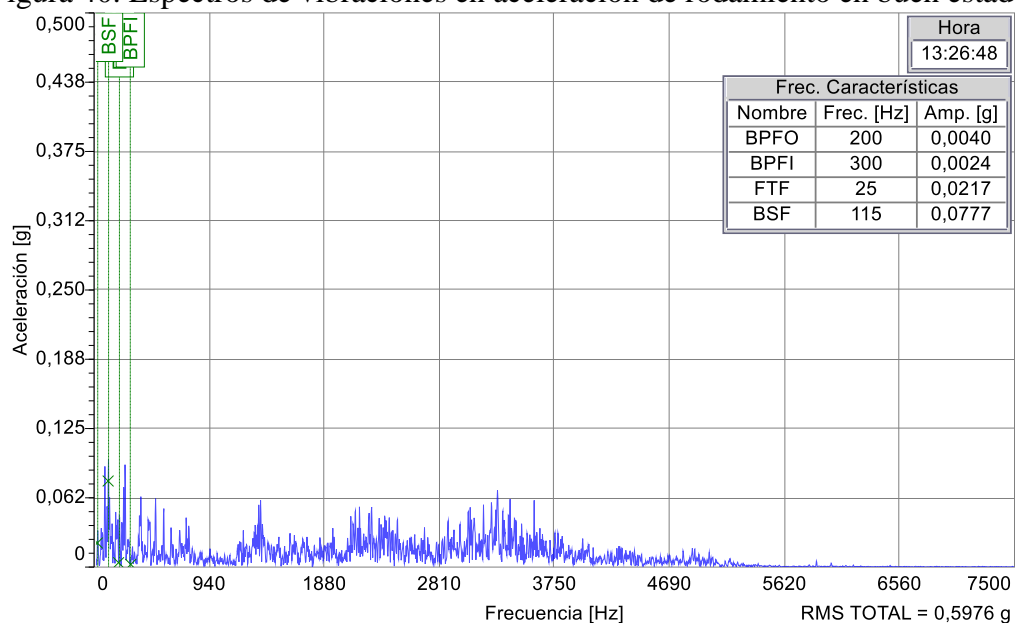
Fuente: Autores

4.2 Mediciones en estado normales de funcionamiento.

Los espectros mostrados a continuación corresponden a datos tomados en condiciones normales de funcionamiento para el rodamiento 6204_RS, lo cual significa que aún no hay presencia de ningún tipo de falla incipiente en el rodamiento.

4.2.1 Mediciones realizadas con el equipo de análisis de vibraciones en condiciones normales. Para tomar como línea base los valores del espectro de vibraciones, se procede a registrar los valores de envolvente para compararlos a medida que se incrementa el valor de desalineación angular controlada.

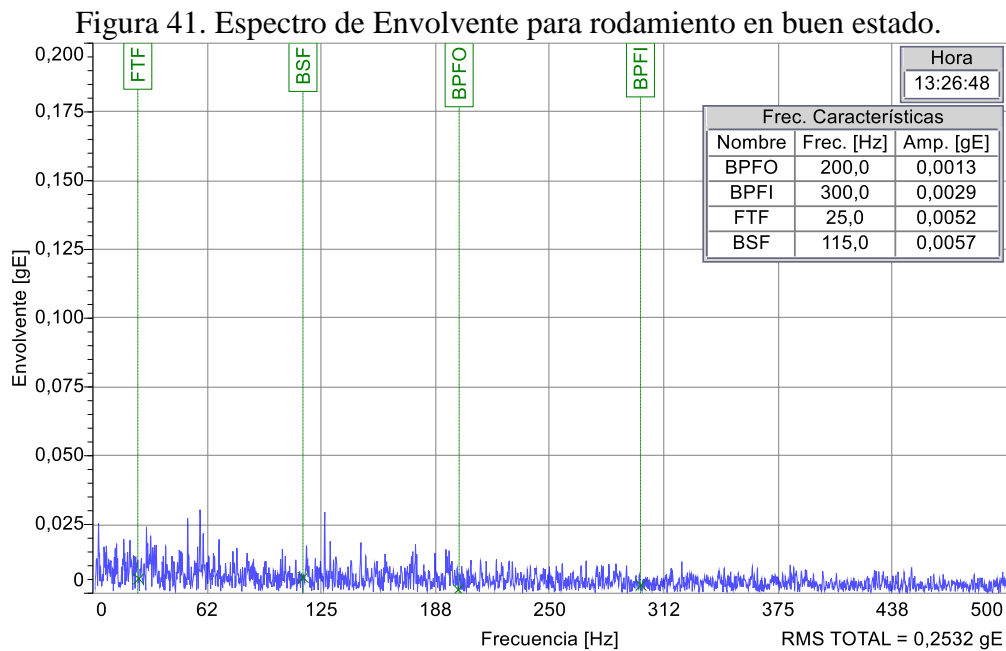
Figura 40. Espectros de vibraciones en aceleración de rodamiento en buen estado.



Fuente: Autores

Nótese que en el espectro de aceleración no presentan armónicos apreciables en el rango de frecuencias sobre los 2 kHz, que es donde se suele observar la frecuencia natural del rodamiento, en el caso del espectro de envolvente de aceleración no se aprecia picos de

frecuencias características de los componentes de un rodamiento ya que esto es lo que se espera de un rodamiento en buen estado.



Fuente: Autores

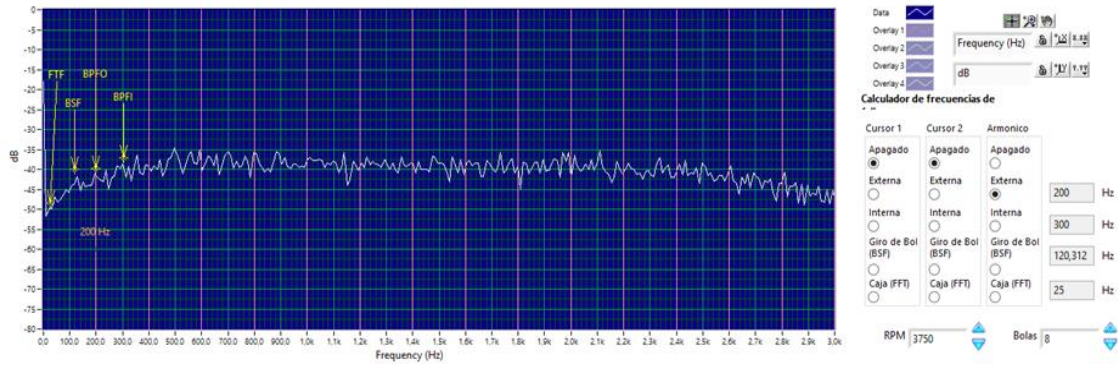
Tabla 10. Valores en condiciones normales correspondientes a Análisis de vibraciones.

Tiempo inicial		
Desalineación 0 radianes		
Análisis de vibraciones		
Frecuencia de falla	[Hz]	Amplitud [gE]
BPFO	200	0,0013
BPFI	300	0,0029
FTF	25	0,0052
BSF	115	0,0057

Fuente: Autores.

4.2.2 *Mediciones realizadas con el equipo de ultrasonido pasivo para condiciones normales.* Para tomar como línea base los valores del espectro de ultrasonido, se procede a registrar los valores en escala de decibeles para posteriormente realizar la comparación a medida que se avanza con la desalineación angular controlada, este espectro se toma con un rodamiento nuevo y sin desalineación para partir desde este punto analizar el incremento en los decibeles.

Figura 42. Espectro de ultrasonido para rodamiento en buen estado.



Fuente: Autores

Como se observa este espectro (Figura 42), no presenta ningún armónico, esto debido a que el rodamiento analizado se encuentra en buen estado de funcionamiento; lo que significa que aún no ha desarrollado algún tipo de falla.

Este espectro es considerado como línea base debido a que estos valores obtenidos nos servirán para futuras referencias al momento de realizar un análisis de tendencias, mediante el software se observa en la (Figura 42) que el equipo genera unas frecuencias características que son calculadas con la velocidad de giro y los elementos rodantes, esas frecuencias son iguales o cercanas a los valores que se calcula mediante las formulas dadas anterior mente ya que existe un margen de error mínimo el cual se recomienda en el momento del análisis aproximar al valor más cercano.

Tabla 11. Valores en condiciones normales correspondientes a Ultrasonido.

Estado inicial		
Desalineación 0 [mrad]		
Ultrasonido		
Frecuencia de falla	[Hz]	Amplitud [dB]
BFFO	200	-55,37
BRFI	300	-46,00
FTF	25	-63,00
BSF	115	-58,00

Fuente: Autores

4.3 Desalineación angular controlada.

Se procede a realizar una tabla de valores obtenidos por los equipos, para el caso de vibraciones hemos utilizado el espectro de envolvente de aceleración y espectro de

ultrasonido pasivo para el otro caso, con desalineaciones angulares controlada de 5,2; 10,4; 15,7 y 22,7 mrad. En tiempos progresivos de 5 minutos hasta el 100% del tiempo total de ensayo que corresponde a 4 horas que se realiza el ensayo o permaneció en funcionamiento; es decir, se expresa los valores en amplitud que van adquiriendo cada una de sus frecuencias características de fallos para diferente desalineación angular controlada en el tiempo, se puede observar cómo va incrementando al incrementar la desalineación o ya sea si el tiempo es mayor cada vez, para cada frecuencia de fallo es diferente.

Tabla 12. Valores registrados para 5,2 mrad de desalineación.

Desalineación 5,2 mrad								
Tiempo [min]	BPFO		BPFI		FTF		BSF	
	Amplitudes		Amplitudes		Amplitudes		Amplitudes	
	[gE]	[dB]	[gE]	[dB]	[gE]	[Db]	[gE]	[dB]
30	0,0260	-56,00	0,0003	-45,00	0,0109	-64,00	0,004	-56,00
60	0,0295	-53,30	0,0072	-46,08	0,0115	-66,65	0,0167	-59,65
90	0,0251	-52,93	0,0081	-41,85	0,0164	-61,97	0,0196	-54,96
120	0,0295	-50,78	0,0094	-49,98	0,0167	-58,52	0,0252	-48,96
150	0,0269	-49,05	0,0103	-53,04	0,0020	-64,22	0,0064	-57,17
180	0,0290	-48,32	0,0099	-48,66	0,0145	-58,76	0,0092	-53,58
210	0,0387	-46,26	0,0084	-44,67	0,0229	-59,86	0,0073	-52,91
240	0,0528	-45,86	0,0060	-45,46	0,0222	-64,22	0,0050	-53,31

Fuente: Autores

Tabla 13. Valores registrados para 10,4 mrad de desalineación.

Desalineación 10,4 mrad								
Tiempo [min]	BPFO		BPFI		FTF		BSF	
	Amplitudes		Amplitudes		Amplitudes		Amplitudes	
	[gE]	[dB]	[gE]	[dB]	[gE]	[dB]	[gE]	[dB]
30	0,0109	-46,52	0,0067	-40,05	0,0020	-60,52	0,0050	-48,99
60	0,0108	-47,70	0,0155	-45,65	0,0033	-65,37	0,0034	-57,29
90	0,0064	-47,70	0,0170	-49,75	0,0131	-61,60	0,0131	-56,32
120	0,0130	-42,85	0,0180	-43,07	0,0101	-46,62	0,0026	-44,79
150	0,0129	-41,02	0,0043	-40,16	0,0056	-45,01	0,0042	-41,24
180	0,0073	-47,70	0,0118	-47,70	0,0089	-59,66	0,0019	-45,22
210	0,0168	-49,10	0,0055	-49,10	0,0051	-60,30	0,0119	-52,55
240	0,0129	-42,96	0,0010	-42,32	0,0058	-56,43	0,0049	-43,93

Fuente: Autores

Tabla 14. Valores registrados para 15,7 mrad de desalineación.

Desalineación 15,7 mrad									
Tiempo [min]	BPFO		BPFI		FTF		BSF		
	Amplitudes		Amplitudes		Amplitudes		Amplitudes		
	[gE]	[dB]	[gE]	[dB]	[gE]	[dB]	[gE]	[dB]	
30	0,0128	-48,02	0,0130	-46,09	0,0223	-55,67	0,0076	-51,36	
60	0,0174	-46,30	0,0072	-43,72	0,0129	-58,58	0,0166	-50,51	
90	0,0163	-46,84	0,0249	-48,35	0,0228	-59,34	0,0040	-53,63	
120	0,0099	-45,85	0,0125	-45,55	0,0152	-48,69	0,0163	-52,66	
150	0,0546	-42,10	0,0138	-41,88	0,0224	-53,95	0,0068	-43,61	
180	0,0270	-40,48	0,0120	-40,81	0,0208	-54,27	0,0130	-46,84	
210	0,0373	-44,79	0,0128	-43,18	0,0143	-57,83	0,0133	-49,96	
240	0,0387	-41,13	0,0029	-42,10	0,0134	-59,01	0,0114	-50,07	

Fuente: Autores

Tabla 15. Valores registrados para 22,7 mrad de desalineación.

Desalineación 22,7 mrad									
Tiempo [min]	BPFO		BPFI		FTF		BSF		
	Amplitudes		Amplitudes		Amplitudes		Amplitudes		
	[gE]	[dB]	[gE]	[dB]	[gE]	[dB]	[gE]	[dB]	
30	0,0071	-51,85	0,0057	-38,01	0,0122	-58,76	0,0100	-50,92	
60	0,0404	-51,58	0,0198	-44,27	0,0349	-62,75	0,0022	-53,44	
90	0,0640	-42,80	0,0187	-42,56	0,0510	-63,36	0,0021	-53,31	
120	0,0328	-54,16	0,0131	-46,30	0,0469	-64,72	0,0114	-46,09	
150	0,0385	-34,24	0,0103	-28,10	0,1263	-57,05	0,0112	-41,35	
180	0,0247	-37,14	0,0257	-42,93	0,1271	-45,98	0,0064	-46,52	
210	0,0184	-45,01	0,0409	-38,33	0,1336	-56,21	0,0042	-34,13	
240	0,0529	-36,17	0,0243	-33,59	0,1463	-49,42	0,0053	-43,82	

Fuente: Autores

CAPÍTULO V

5. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se realiza el análisis de los diferentes espectros de vibraciones como de ultrasonido con el fin de determinar con cuál de las dos técnicas se hace evidente el inicio de un fallo incipiente además se realiza el análisis de severidad basados en tablas referenciales suministradas por los fabricantes de los equipos utilizados en las mediciones y como aporte final se realiza un análisis por etapas en la evolución del fallo para 22,7 mrad de desalineación angular.

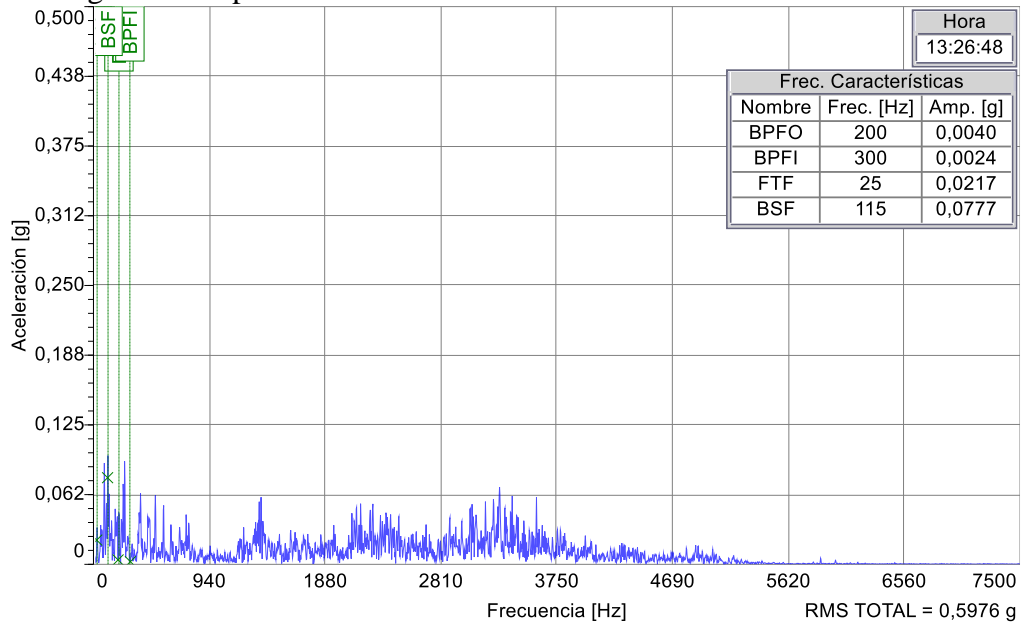
Se ha utilizado la técnica de envolvente en vibraciones para este análisis siguiendo lo dispuesto en la norma ISO 10816-1,1995, la cual permite filtrar señales de vibración de alta frecuencia.

5.1 Espectros característicos para el rodamiento 6204_RS sin desalineación y en buen estado.

Como se ha mencionado anteriormente los rodamientos en buen estado generan algún tipo de vibración aleatoria, a causa de la interacción de los componentes que los conforman, los siguientes espectros servirán de punto de partida para tener una idea clara de que podemos esperar de un rodamiento sano y sin desalineación, los espectros son capturados a una velocidad de funcionamiento de 3750 rpm el cual por relación de transmisión se llega a este valor en el eje dos en el cual está montado el rodamiento y se toma en posición vertical.

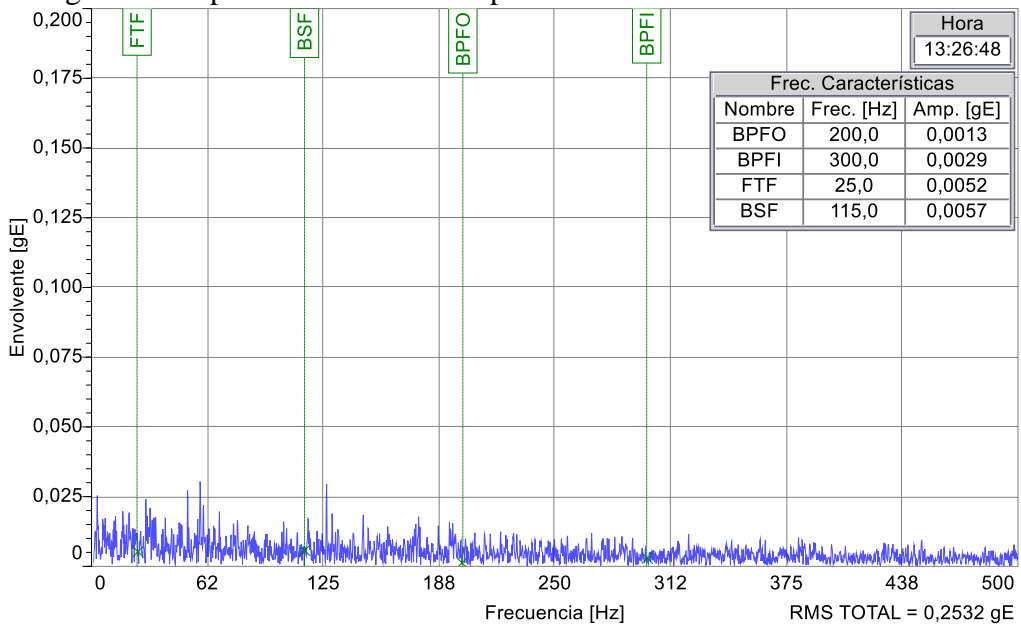
En la (Figura 43). Se puede observar claramente que a pesar de que el rodamiento está en perfecto estado este presente cierto nivel de vibración a baja frecuencia, que incluso pueden generar frecuencias de fallas lo cual no es de sorprenderse, ya que anteriormente se habla que los rodamientos suelen presentar imperfecciones de fábrica llamados defectos distribuidos, los cuales son causantes de que estos picos se activen. Además en el espectro se puede observar la no presencia de bandas espectrales entre 3 y 7 kHz (Presencia de frecuencia de resonancia del rodamiento) cumpliéndose así lo esperado para un rodamiento en buen estado.

Figura 43. Espectro de Vibración del rodamiento 6204 en buen estado.



Fuente: Autores

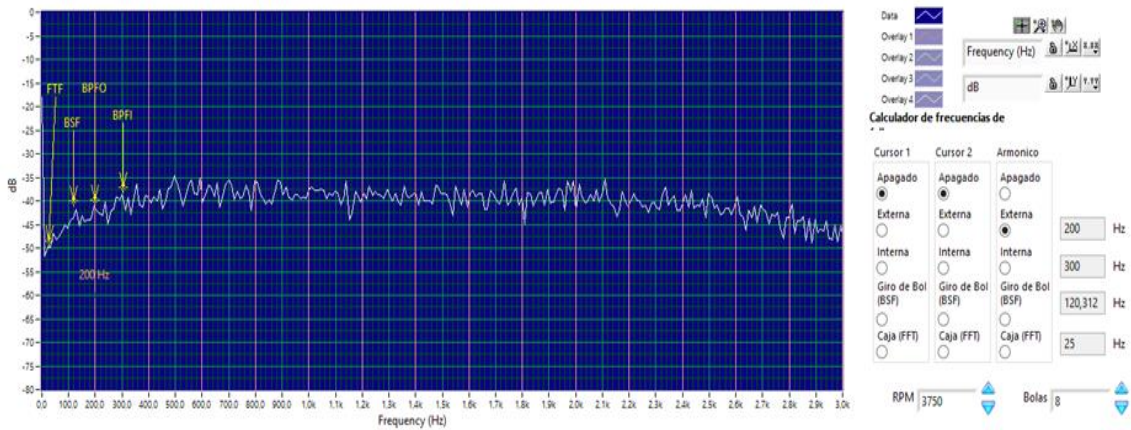
Figura 44. Espectro de Envoltura para rodamiento 6204 en Buen Estado.



Fuente: Autores

En la (Figura 44), se puede apreciar el espectro de envoltura de vibración utilizado para la detección temprana de fallos en rodamientos el cual para este caso no presenta picos a ninguna frecuencia característica de fallo y sus valores de amplitud son despreciables estableciendo a frecuencias características de los 200, 300, 25 y 115 Hz que corresponde a las pistas, elemento rodante y jaula, como es de esperarse para un rodamiento en buen estado.

Figura 45. Espectro de Ultrasonido del rodamiento 6204 en buen estado.



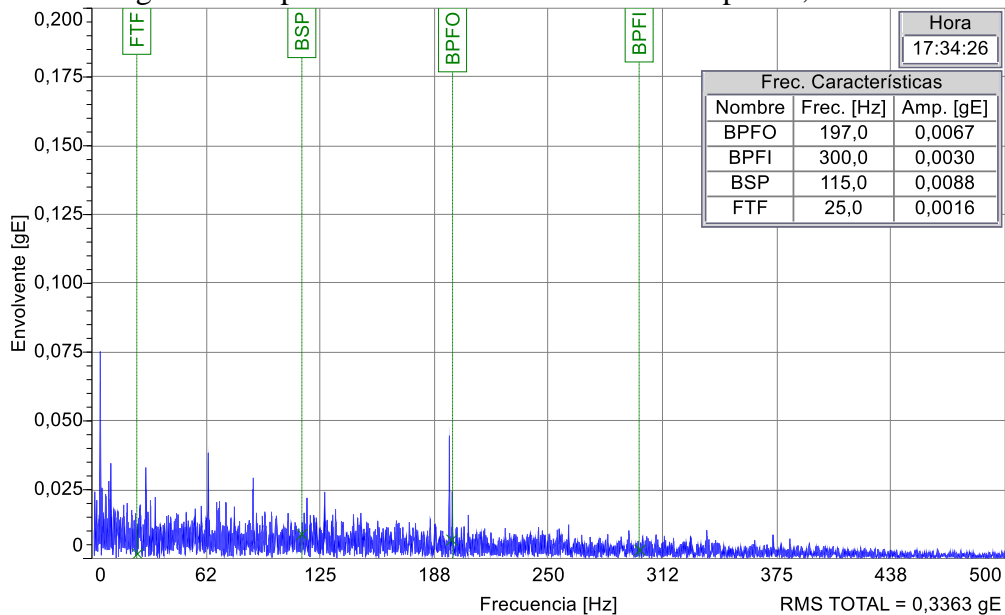
Fuente: Autores

En la (Figura 45). Se muestra el espectro característico de ultrasonido para el rodamiento 6204 en buen estado, se puede observar que no existen componentes de frecuencia comprobando así que el rodamiento se encuentra en buen estado.

5.2 Comparación de resultados en la detección de fallos incipientes en rodamientos utilizando análisis de vibraciones vs ultrasonido con 5,2 mrad de desalineación angular controlada.

En la (Figura 46). Se muestra como es detectado el incremento de amplitud en la frecuencia característica de pista externa al transcurrir cuatro horas de funcionamiento.

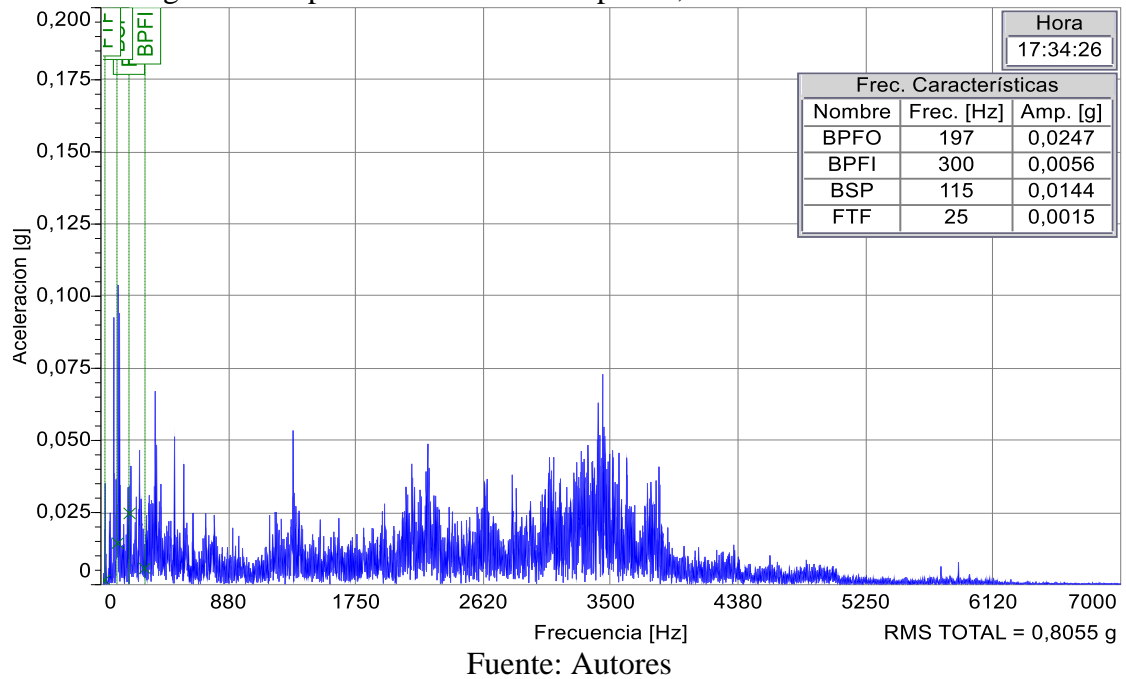
Figura 46. Espectro de envoltura de vibración para 5,2 mrad.



Fuente: Autores

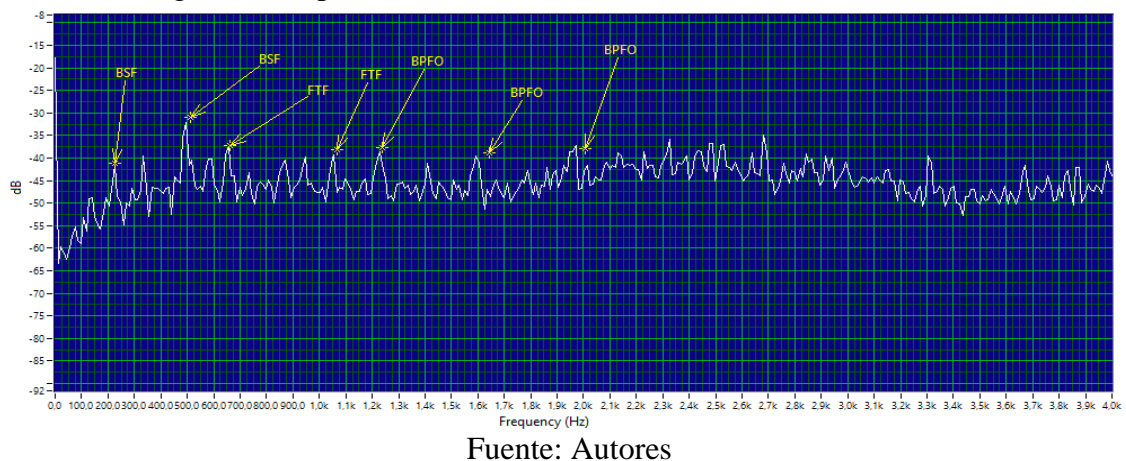
Con una desalineación de 5,2 mrad, mediante la técnica de envolvente en análisis de vibraciones ligeramente se observa un incremento en las demás frecuencias pertenecientes a los otros componentes del rodamiento.

Figura 47. Espectro de Aceleración para 5,2 mrad de desalineación.



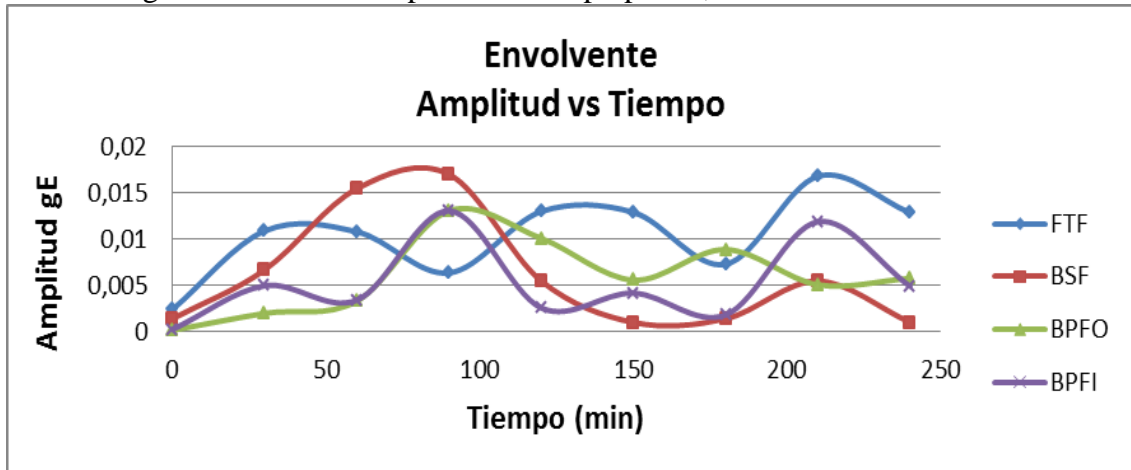
En la (Figura 47). Se observa el primer síntoma que presentan los rodamientos al estar desarrollando ciertos tipos de fallas incipientes, este primer síntoma se manifiesta mediante una vibración con presencia de componentes de alta frecuencia producto de la generación de ondas de esfuerzo presentes en banda ancha con presencia de armónicos no sincrónicos en dicha zona.

Figura 48. Espectro de ultrasonido con 5,2 mrad de desalineación.



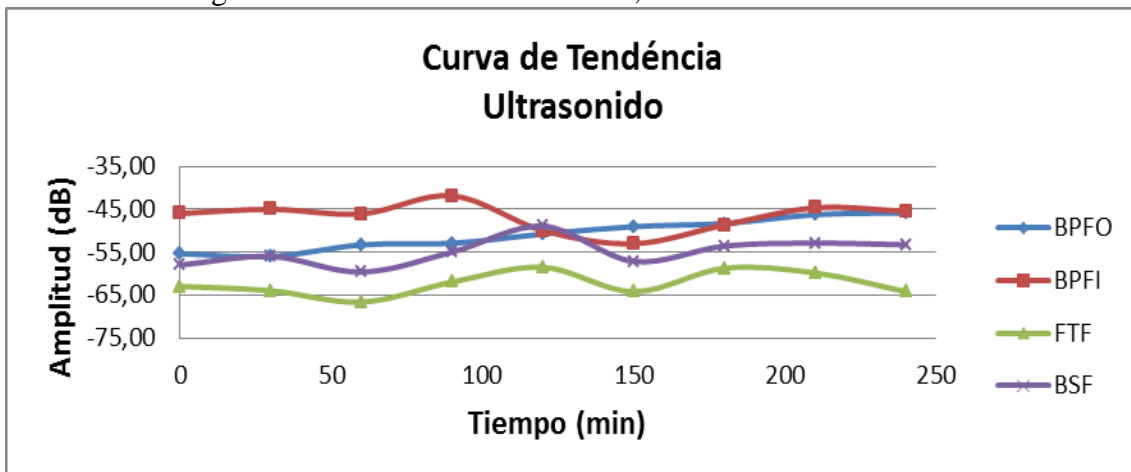
En la (Figura 48). Se pueden observar como es detectado al 50% (120min) del tiempo total de ensayo respecto al tiempo de detección por el análisis de vibraciones sometido al mismo desalineamiento angular 5,2 mrad, el incremento de amplitud de algunas frecuencias características se hace evidente lo cual nos da un indicio de que algo anormal está sucediendo en los componentes a las cuales pertenecen dichas frecuencias.

Figura 49. Grafica Amplitud vs tiempo para 5,2 mrad de desalineación.



Fuente: Autores

Figura 50. Curva de tendencia de 5,2 mrad de desalineación.



Fuente: Autores

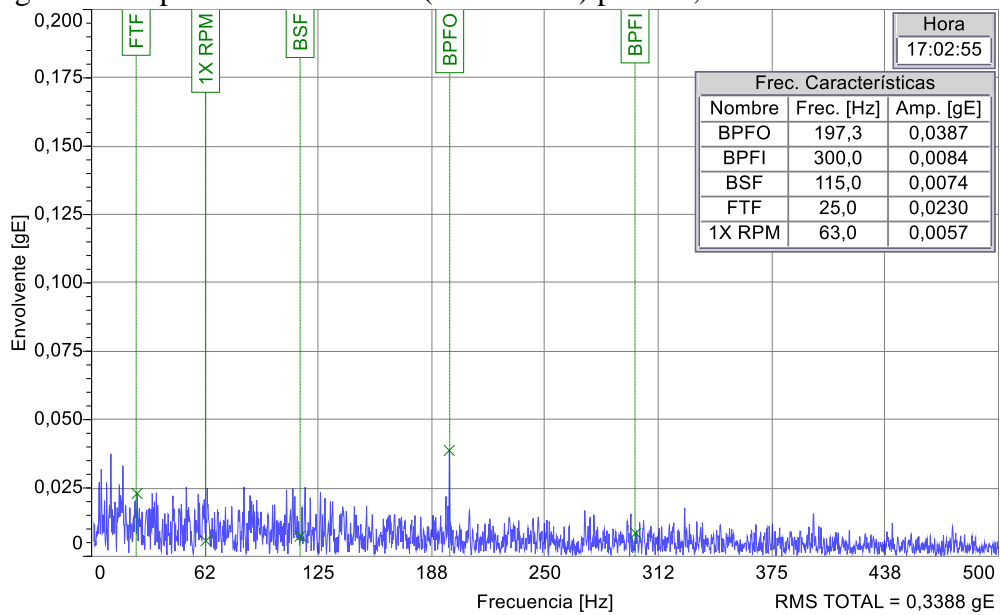
Se ha construido las gráficas de tendencia (Figura 49 y 50). Con los datos de la (Tabla 12), para evaluar el incremento de las amplitudes que sufren los componentes del rodamiento tanto en vibraciones (Envolvente) como en ultrasonido y de esta manera poder determinar la severidad que van adquiriendo cada uno de estos elementos al transcurrir el tiempo total del ensayo, también se aprecia una distorsión en las curvas

producto del incremento de temperatura en el porta rodamientos esto debido a la desalineación angular a la cual está sometido.

5.3 Comparación de resultados en la detección de fallos incipientes en rodamientos utilizando análisis de vibraciones vs ultrasonido con 10,4 mrad (1mm) de desalineación angular controlada.

En la (Figura 51). Se observa claramente cómo existe un incremento en la amplitud de cada una de las frecuencias características de fallo del rodamiento, si la comparamos respecto al espectro de línea base (Figura 44) , siendo más notorio el defecto localizado en pista externa BPFO con una desalineación angular controlada de 10,4 mrad en el transcurso de 45,83% del tiempo total del ensayo.

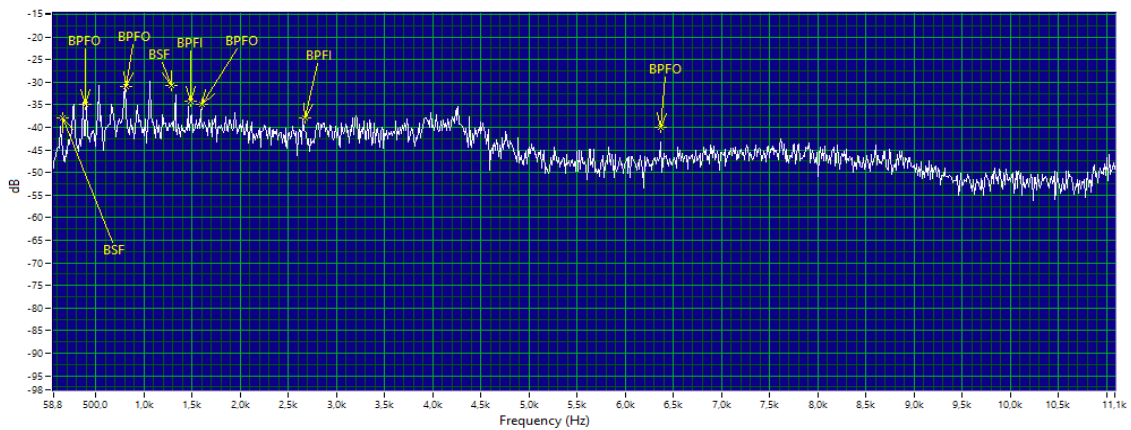
Figura 51. Espectro de Vibración (Envolvente) para 10,4 mrad de desalineación.



Fuente: Autores

En la (Figura 52). Se puede ver claramente el incremento de amplitud de frecuencia de fallo en pista externa transcurrido un 41,66% del tiempo total del ensayo con una desalineación angular controlada de 10,4 mrad (1mm). Deduciendo así que está empezando a darse una condición de deterioro, también se puede evidenciar un leve incremento en la amplitud de frecuencia de fallo en pista interna, 1x es la frecuencia del giro del eje en el cual esta acoplado el rodamiento y sometido a una desalineación angular.

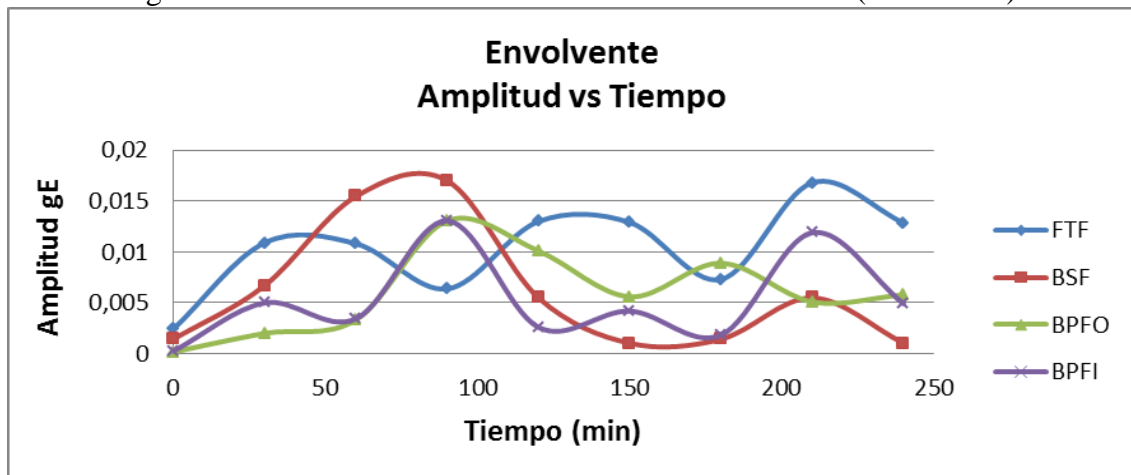
Figura 52. Espectro de ultrasonido con 10,4 mrad de desalineación.



Fuente: Autores

Se realizó curvas de tendencia que permite apreciar el incremento de amplitudes en el 100% del tiempo total de ensayo.

Figura 53. Grafica de curvas de tendencia de vibraciones (envolvente).

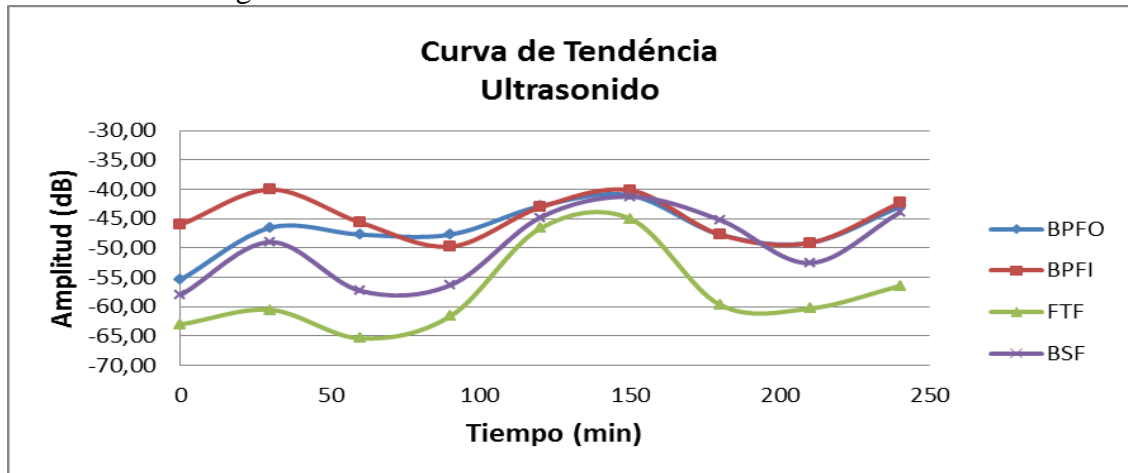


Fuente: Autores

En las (Figuras 53 y 54). Se pueden observar las curvas de tendencia de Amplitud-Tiempo, las cuales permite ver el incremento de amplitudes en las frecuencias características de fallos. Durante el 100% del tiempo total del ensayo. Para así poder evaluar el nivel de vibraciones y de ultrasonido mediante la (Tabla 14).

Se observan distorsiones en las curvas de cada componente debido al incremento de temperatura que produce la desalineación angular inducida en el módulo de inserción de rodamientos en que va a simular fallas en rodamientos la temperatura produce errores de medición por parte del equipo.

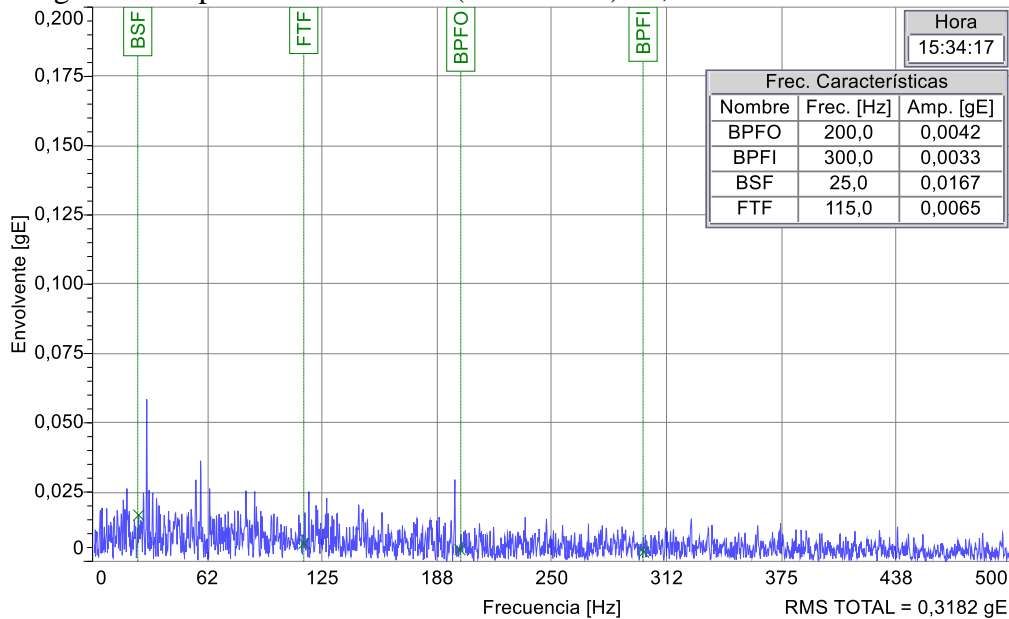
Figura 54. Grafica de curva de tendencia de ultrasonido.



Fuente: Autores

5.4 Comparación de resultados en la detección de fallos incipientes en rodamientos utilizando análisis de vibraciones vs ultrasonido con 15,7 mrad (1,5mm) de desalineación angular controlada.

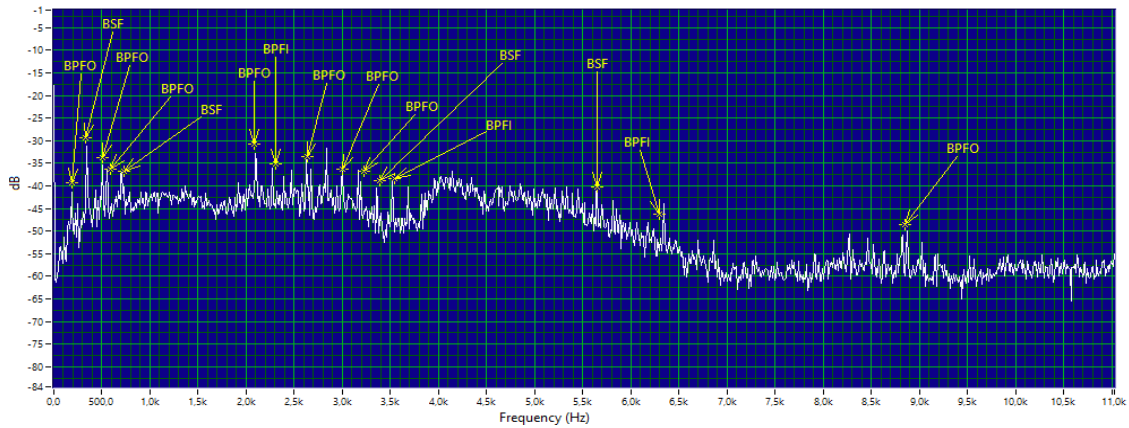
Figura 55. Espectro de vibración (Envolvente) 15,7 mrad de desalineación.



Fuente: Autores

En la (Figura 55). Se muestra como bajo una desalineación angular de 15,7 mrad y transcurrido el 22,91% (55min) del tiempo total del ensayo se hace evidente picos en las frecuencias características del rodamiento, el incremento de amplitudes en frecuencias de pista externa y jaula pudiéndose diagnosticar una condición anormal en estos elementos.

Figura 56. Espectro de Ultrasonido para 15,7 mrad de desalineación.

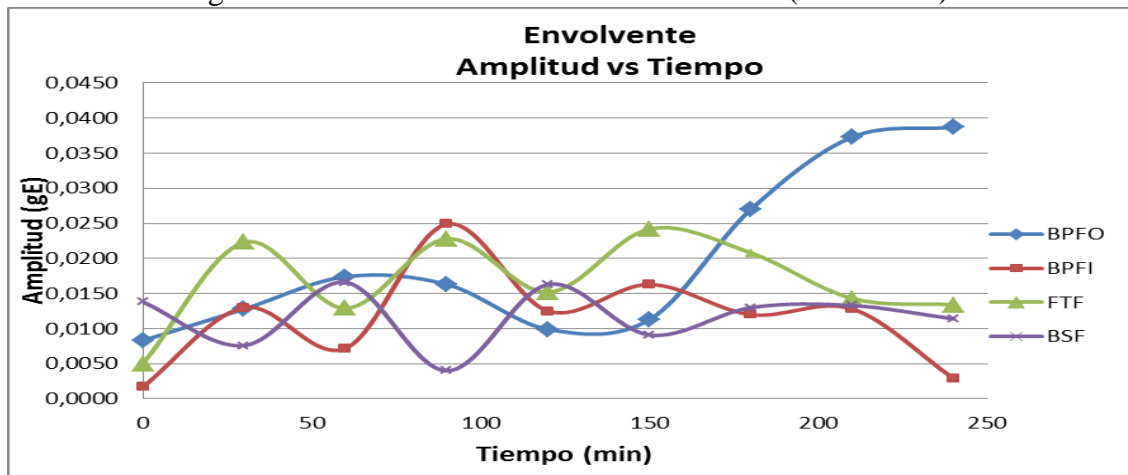


Fuente: Autores

En la (Figura 56). Se puede observar de una forma muy evidente el incremento de amplitud en frecuencias correspondientes a pista externa, interna y elemento rodante transcurrido el 14,58% (35min) del tiempo total del ensayo, con respecto al análisis de vibración la técnica de ultrasonido pasivo detecta anomalías en menor tiempo al estar sometido a igual desalineación en vibraciones.

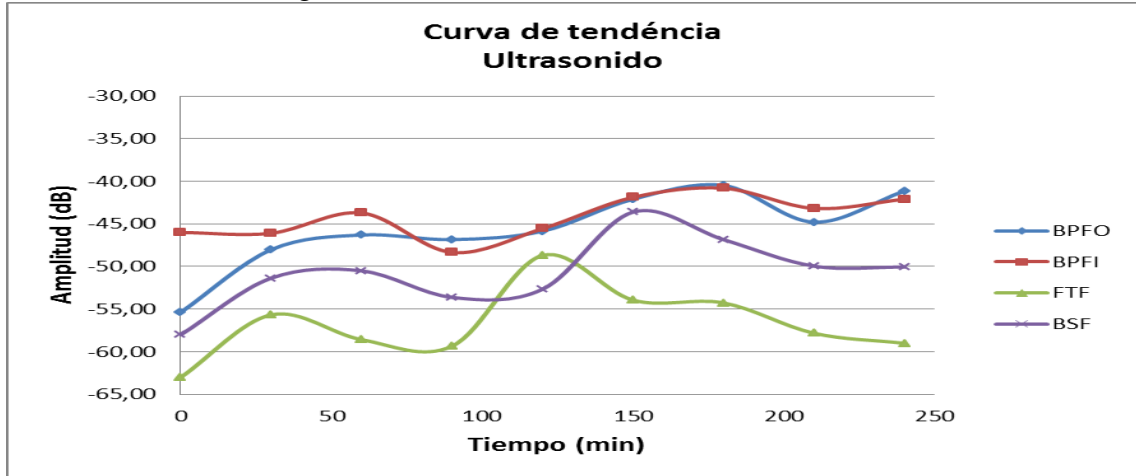
Se ha construido las gráficas de tendencia tiempo vs amplitud, con los datos de la (Tabla 15), para evaluar el incremento de amplitud que sufren los componentes del rodamiento tanto para análisis de vibraciones (Envolvente) como para ultrasonido pasivo y de esta manera poder determinar la severidad que van adquiriendo cada uno de las partes del rodamiento al transcurrir el 100% del tiempo total del ensayo que corresponde a cuatro horas.

Figura 57. Grafica de tendencia de vibraciones (envolvente).



Fuente: Autores

Figura 58. Grafica de tendencia de ultrasonido.

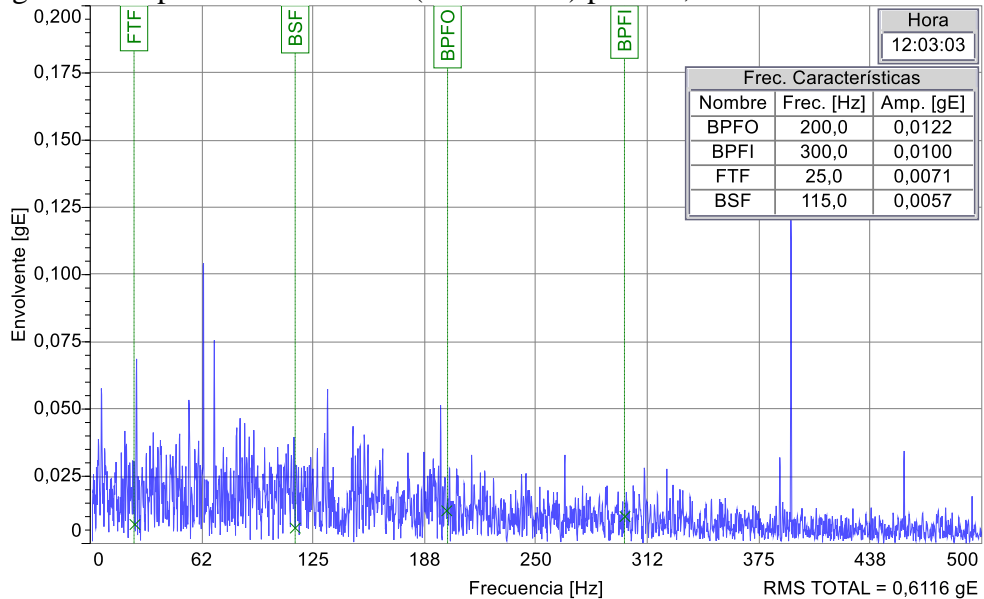


Fuente: Autores

En las (Figuras 57 y 58). Se pueden apreciar cómo se incrementa su amplitud de las frecuencias de fallo, en el caso de vibraciones estas distorsiones son de una escala baja y el incremento es despreciable, en el caso de ultrasonido se observa que es mayor el incremento de los decibeles e incluso supera los rangos de severidad, las distorsiones de estas curvas deben a posibles errores de medición o al incremento de la temperatura.

5.5 Comparación de resultados en la detección de fallos incipientes en rodamientos utilizando análisis de vibraciones vs ultrasonido con 22,7 mrad (2mm) de desalineación angular controlada.

Figura 59. Espectro de vibración (Envolvente) para 22,7 mrad de desalineación.

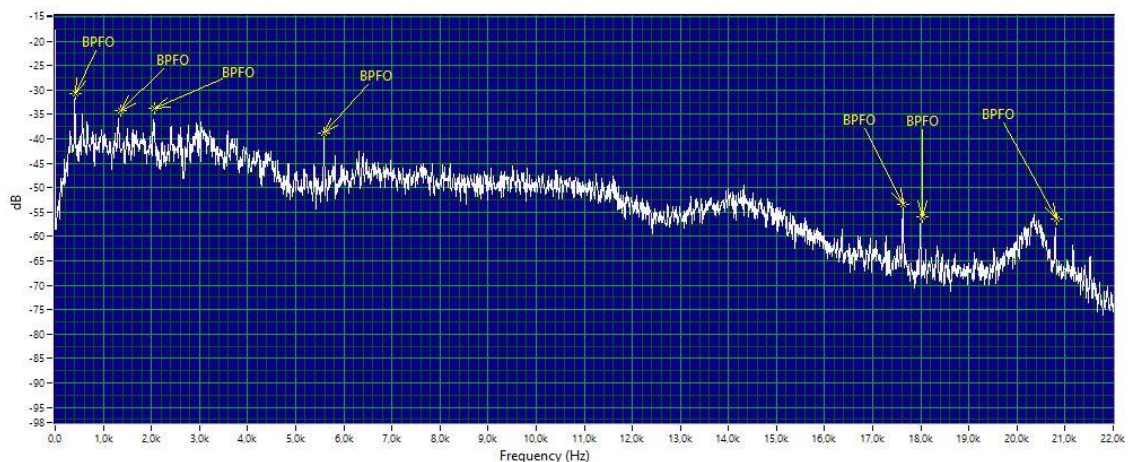


Fuente: Autores

En la (Figura 59). Se muestra como se hace evidente la detección con la técnica de envolvente de vibraciones transcurrido 12,5% (30min) del tiempo total del ensayo al estar sometido a desalineación angular controlada de 22,7 mrad (2 mm), se observa picos en frecuencias de pista externa, jaula.

Además se puede ver un pico en frecuencia de velocidad de giro del motor el cual nos indica que puede estar existiendo una frecuencia de resonancia de banda o algún problema con la polea conducida debido al mismo efecto causado por la desalineación.

Figura 60. Espectro de Ultrasonido para rodamiento 22,7 mrad de desalineación.



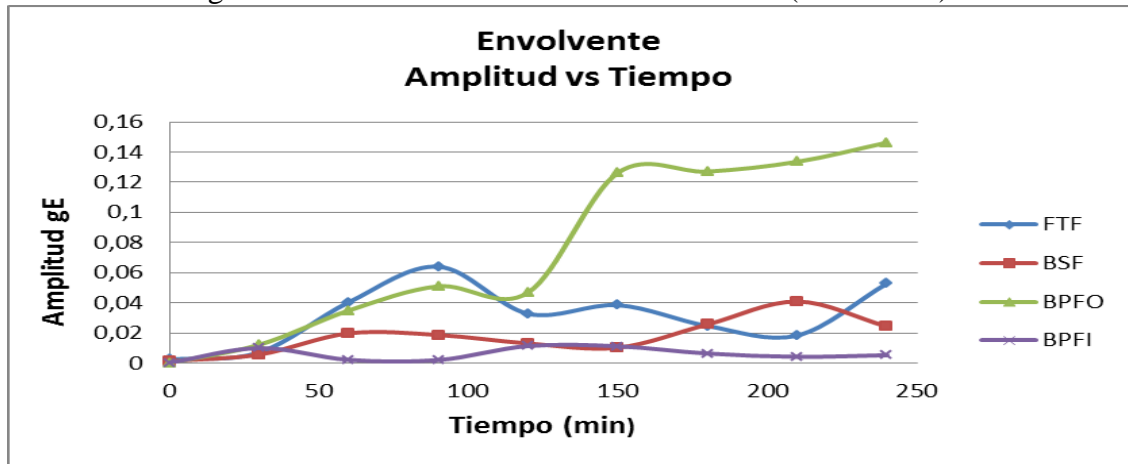
Fuente: Autores

En la (Figura 60). Se observa como se hace evidente la detección con amplitudes en frecuencias características de pista externa, algunos picos para pista interna y levemente para elemento rodante en un 8,33% (20min) del tiempo total del ensayo sometido a la misma condición de desalineación 22,7 mrad.

Se evidencia claramente cómo se empiezan a dar picos a alta frecuencias pertenecientes a los elementos antes mencionados, y el tiempo de detección es menor que el análisis de vibraciones de igual manera que los anteriores casos el análisis de ultrasonido pasivo se anticipa a las fallas incipientes que se están generando en los rodamientos con respecto al análisis de vibraciones.

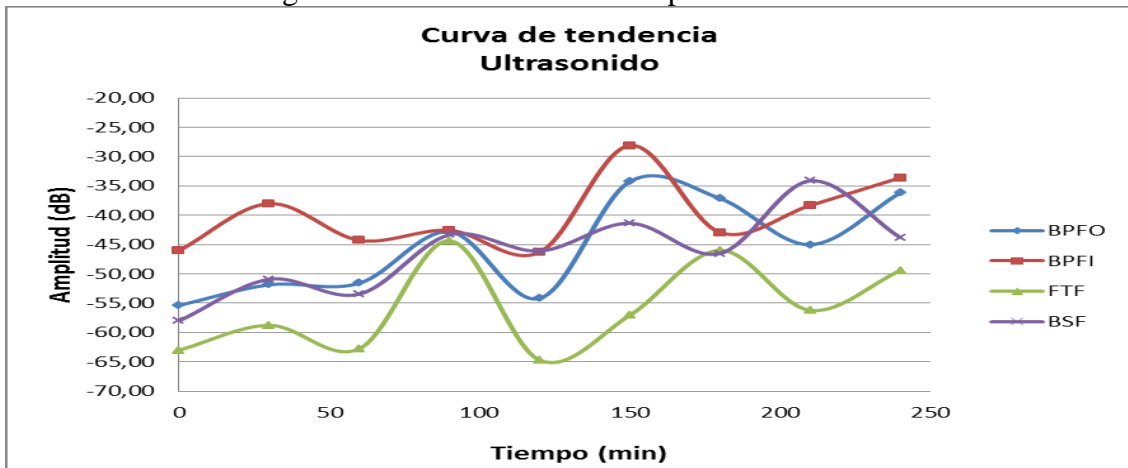
Se construye las curvas de tendencias para el análisis de vibraciones y ultrasonido pasivo, para poder mirar cómo va incrementando sus amplitudes en el tiempo y observar cuál de sus partes es la afectada.

Figura 61. Grafica de tendencia de vibraciones (envolvente).



Fuente: Autores

Figura 62. Grafica de tendencia para ultrasonido.



Fuente: Autores

En las curvas de tendencia en vibraciones (Envolvente) como en ultrasonido poder determinar la severidad que van adquiriendo cada uno de estos elementos al transcurrir el 100% del tiempo total del ensayo, las distorsiones en las curvas se deben a posibles errores de medición o incremento de temperatura en el porta rodamiento donde fueron tomadas las mediciones.

Se puede apreciar una tabla que nos indica un resumen claro de los tiempos de detección de fallas con el análisis de vibraciones como el de ultrasonido pasivo aplicando 4 tipos de desalineación angular controlada en el 100% del tiempo total del ensayo que corresponde a 4 horas de funcionamiento, los tiempos de detección para el caso de ultrasonido pasivo son bajos a diferencia que el análisis de vibraciones son más altos, de tal manera que por ultrasonido detecta con anterioridad.

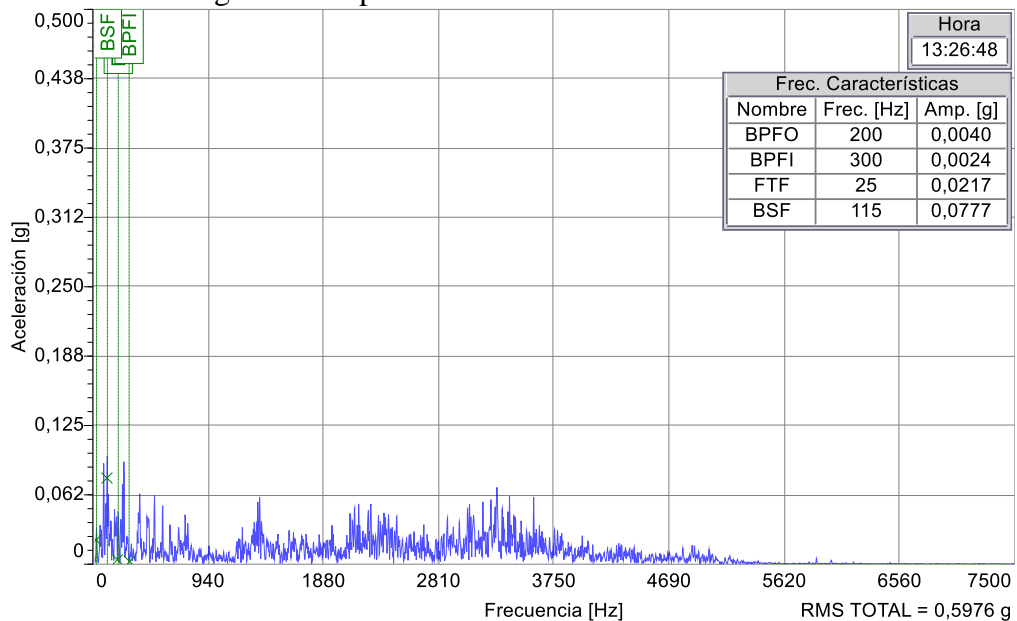
Tabla 16. Tiempos de detección de fallas incipientes

Desalineación Angular [mrad]	Análisis de Vibraciones		Ultrasonido Pasivo	
	Tiempo de detección		Tiempo de detección %	
	%	[min]	%	[min]
5,68	100	240	50	120
11,36	45,83	110	41,66	100
17,04	22,91	55	14,58	35
22,7	12,5	30	8,33	20

Fuente: Autores

5.1.1 *Análisis detallado de envolvente de vibraciones por medio de etapas.* Se analizara la evolución del fallo incipiente en rodamiento 6204_RS sometido a una desalineación angular de 22,7 mrad hasta superar la etapa de severidad referencial.

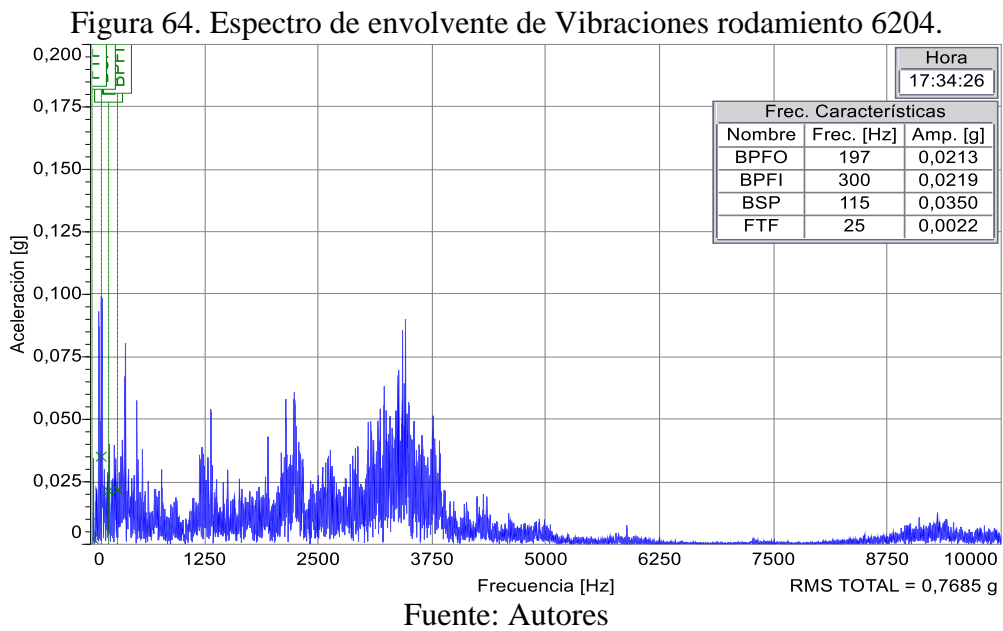
Figura 63. Espectro de envolvente de Vibraciones.



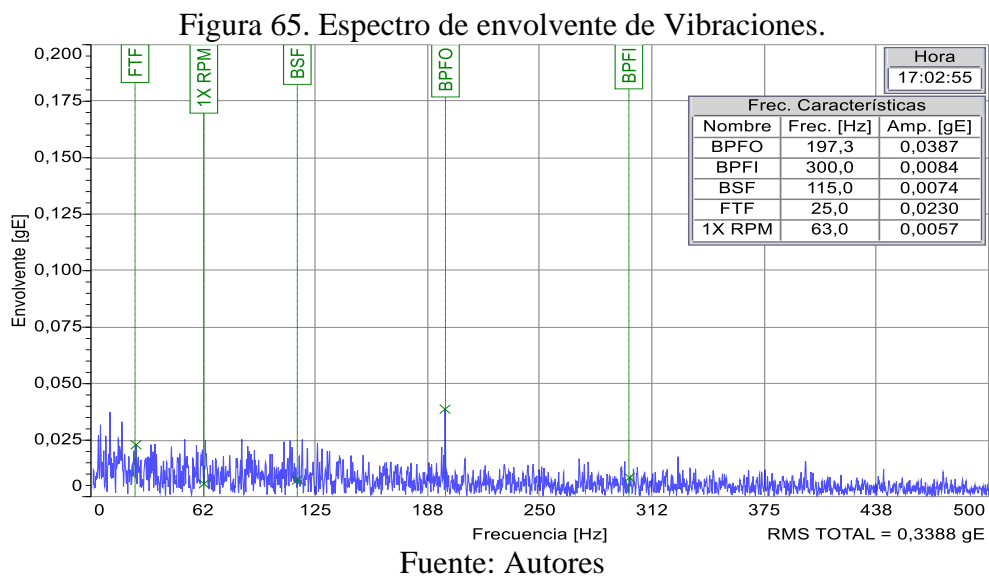
Fuente: Autores

En la (Figura 63), se observa el espectro del rodamiento 6204_RS en aceleración, tomando como referencia las cartas de Charlotte en las cuales indica, que en la primera etapa de fallo incipiente se identifican picos a frecuencias muy altas muy difíciles de detectar, para lo cual se requiere equipos especiales de muy alta sensibilidad, lo cual hace referencia el espectro mostrado en el cual no se observa picos a altas frecuencias, por lo tanto este espectro estaría dentro de la etapa uno de fallo incipiente, este tipo

de picos de frecuencia de fallo se encuentran localizados en frecuencias sobre los 20 kHz, lo cual es imposible visualizar esta etapa, ya no se cuenta con estos equipos.



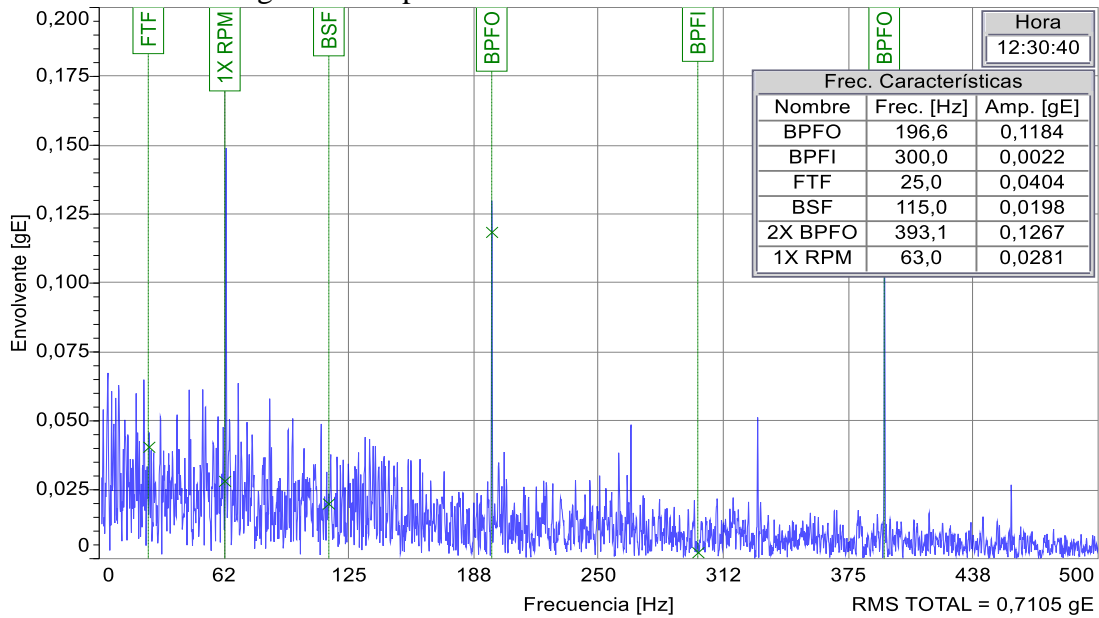
En la (Figura 64), visualiza el espectro de aceleración bajo una desalineación angular de 22,7 mrad en el tiempo de 16.6% (20min) del 100% del tiempo en el cual sobrepasa el límite de severidad, en el cual se muestra como se produce la excitación de las frecuencias naturales del rodamiento, haciéndose presente en una banda ancha de picos en frecuencias entre 2,5 y 3,5 kHz, lo cual es un indicio de que el rodamiento está experimentando un comportamiento anormal, este espectro entraría en la etapa dos haciendo referencia las cartas de Charlotte.



En la (Figura 65), se muestra como en el espectro de envolvente de aceleración es visible un pico en frecuencia de pista externa, producto de la desalineación angular aplicada de 22,7 mrad en un tiempo de 25% (30 min) del 100% del tiempo (120min) en cual ya sobrepasa los límites de severidad.

Esta etapa de falla se denotara como etapa tres de fallo, la excitación de frecuencia natural sigue siendo visible en el espectro de aceleración con tendencia al incremento, mientras que las frecuencias de los otros componentes del rodamiento aun no presentan picos significativos en el espectro de envolvente de aceleración mostrado.

Figura 66. Espectro de envolvente de Vibraciones.

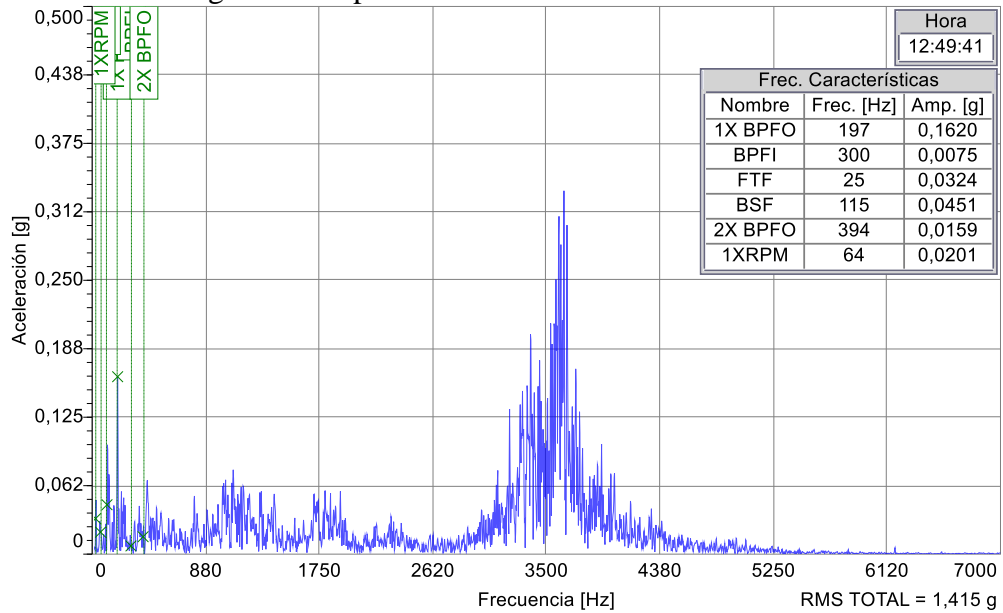


Fuente: Autores

En la (Figura 66), corresponde al espectro de envolvente de aceleración observa cómo se ha desarrollado un armónico de la frecuencia fundamental de fallo característico de pista externa (2X BPF0) al transcurrir el 37,5% (45min) del 100% (120min) de tiempo en el cual sobrepasa el límite admisible de severidad proporcionado por IDEAR como valor de referencia de la máxima de vibración que debe tener un rodamiento.

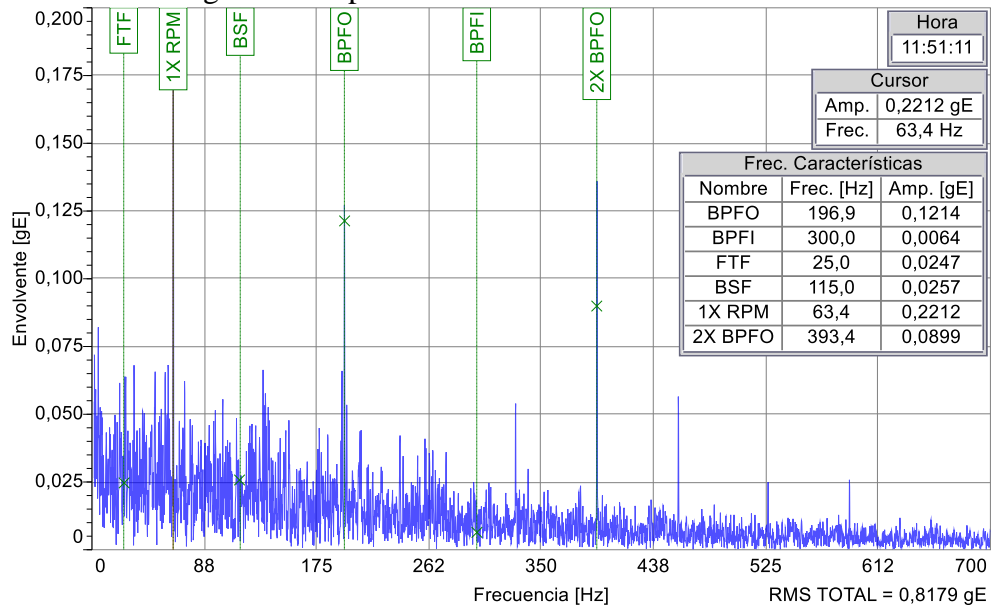
Se aprecia la excitación de la frecuencia natural el cual sigue presente en el espectro de aceleración con tendencia al incremento entre las bandas de 3 a 4 kHz como se muestra en la (Figura 67), la frecuencia natral o de resonancia también se la conoce como pajar. Esta evolución en el espectro se considera como etapa cuatro.

Figura 67. Espectro de envoltura de Vibraciones.



Fuente: Autores

Figura 68. Espectro de envoltura de Vibraciones.

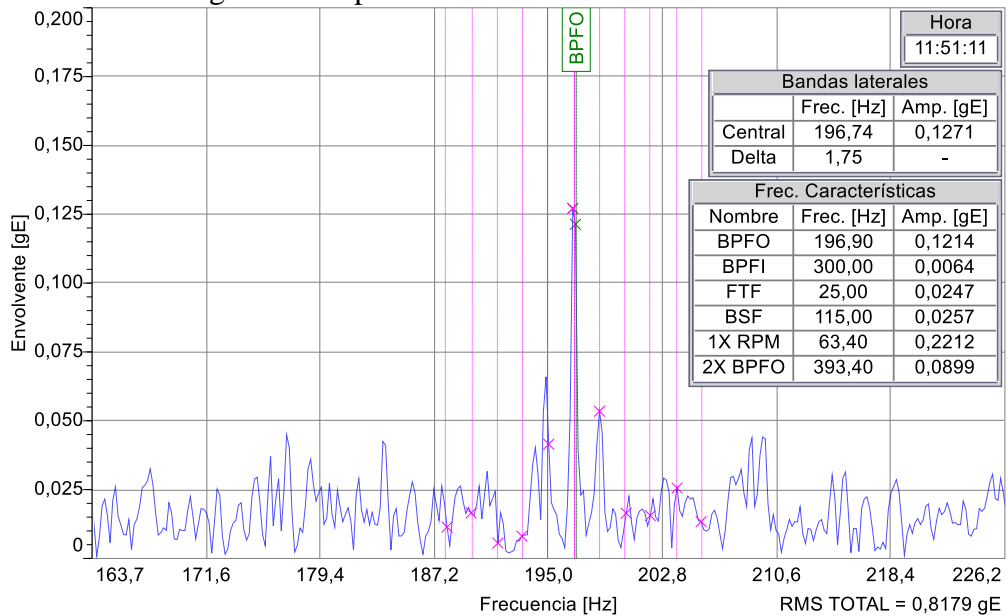


Fuente: Autores

En la (Figura 68), espectro de envoltura de aceleración se puede observar picos y armónicos para la frecuencia característica de fallo en pista externa al transcurrir el tiempo de 58,33% (70min) del 100% (120min) del tiempo total en el cual sobrepasa el límite de severidad, en estos picos empiezan a generarse bandas laterales como se muestra en la (Figura 69), esto denota cómo evoluciona el fallo y denominando a esta evolución como etapa cinco, también se puede notar picos en otras frecuencias las

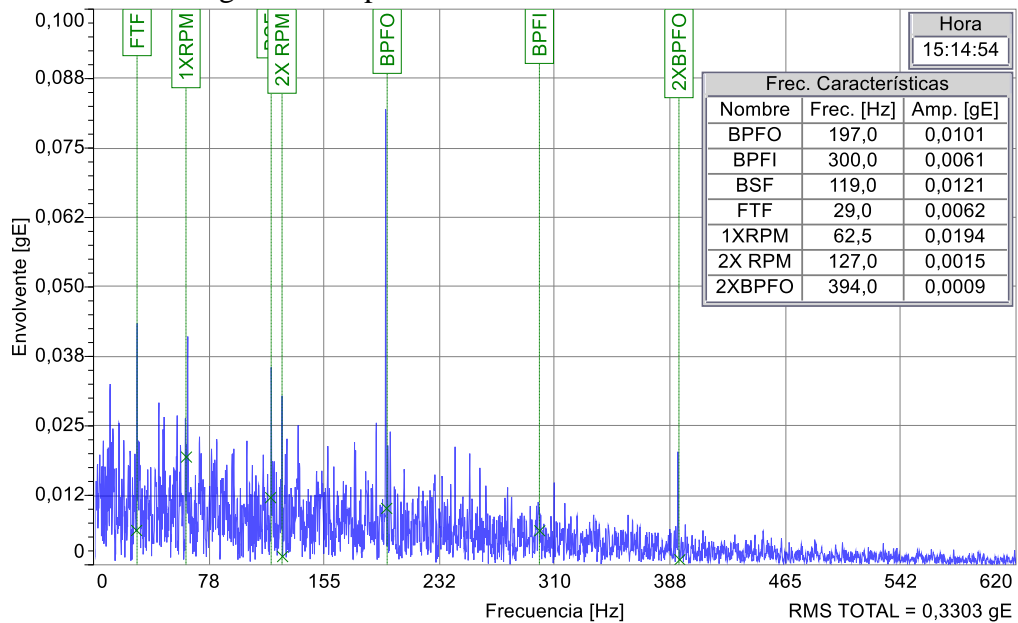
cuales se podrían estar generando debido a la desalineación angular a la cual está sometido el rodamiento.

Figura 69. Espectro de envoltura de Vibraciones.



Fuente: Autores

Figura 70. Espectro de envoltura de Vibraciones.



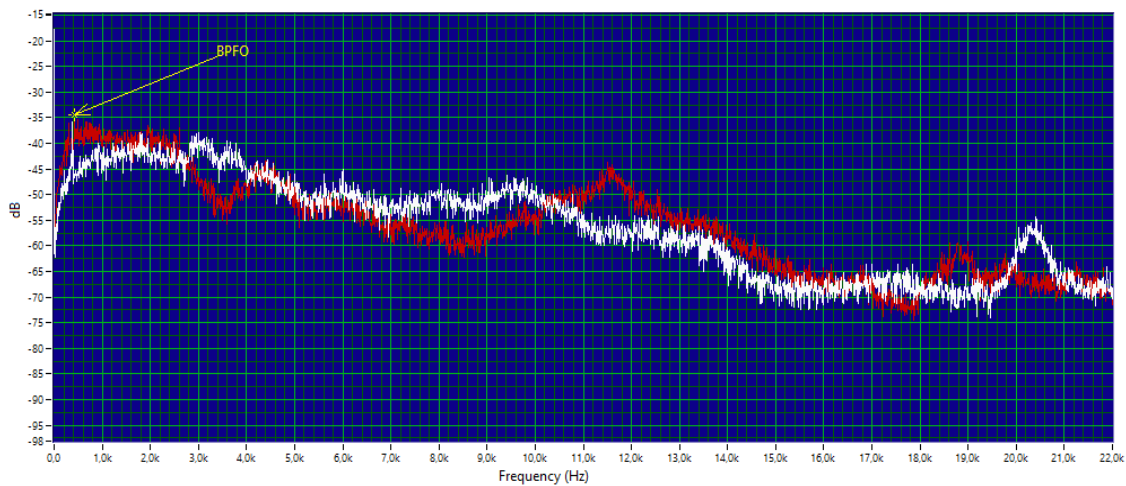
Fuente: Autores

En la (Figura 70). Se observa como al transcurrir el tiempo el espectro va mostrando nuevas características al transcurrir el 75% (90min) con relación al 100% del tiempo total en el cual sobrepasa el límite admisible de severidad, aparte de los armónicos y

bandas laterales para frecuencia características de fallo en pista externa ya presentes, se suman armónicos de frecuencia de giro las cuales dan una alerta que el deterioro en el rodamiento es inminente. Esta evolución en el espectro se lo considera como etapa seis haciendo referencia a las cartas de Charlotte.

5.1.2 *Análisis detallado de ultrasónico pasivo por medio de etapas.* Se analiza la evolución del fallo incipiente en rodamiento 6204_RS sometido a una desalineación angular controlada de 22,7 mrad hasta superar la etapa de severidad admisible referencial.

Figura 71. Espectro de ultrasonido Etapa 1.

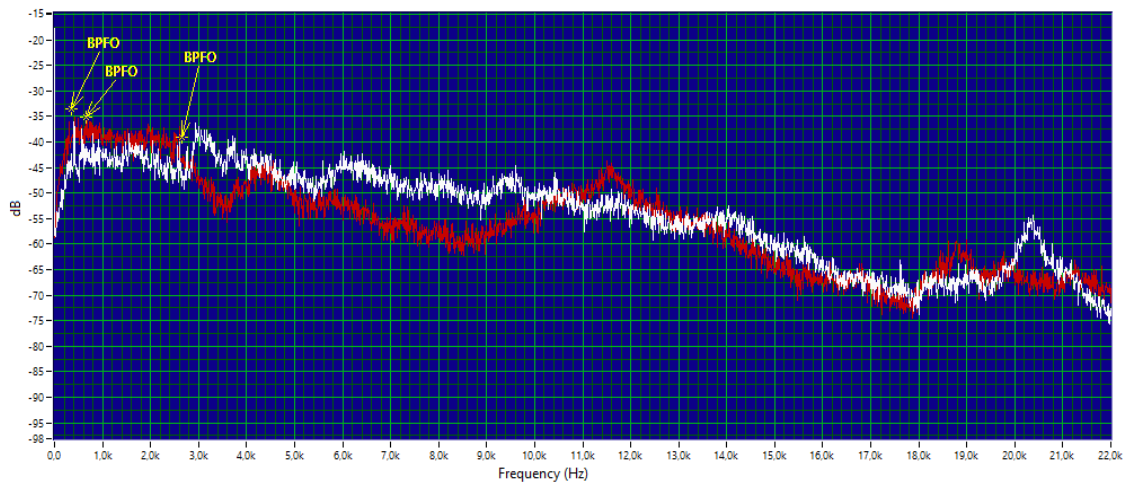


Fuente: Autores

En la (Figura 71), se observa el espectro color rojo que corresponde a la línea base del rodamiento (Rodamiento en buen estado), la cual se toma como referencia para evaluar las diferentes características que se van desarrollando en el espectro, a medida que transcurre el ensayo, en este espectro en particular perteneciente al tiempo de 11% (10min) del 100% (90min) del tiempo en el cual sobrepasa la severidad.

Se muestra como hay un incremento de los decibeles sobre la línea base que se encuentra congelada de color rojo para poder apreciar de una mejor manera la evolución de estas fallas, también se ha desarrollado un pequeño pico en frecuencia de fallo para pista externa lo cual da una referencia del componente que primero genera señales de condición anormal al estar sometido a una desalineación angular, sin embargo no se aprecia picos significativos en altas frecuencias esta etapa se considerar como etapa 1.

Figura 72. Espectro de ultrasonido Etapa 2.

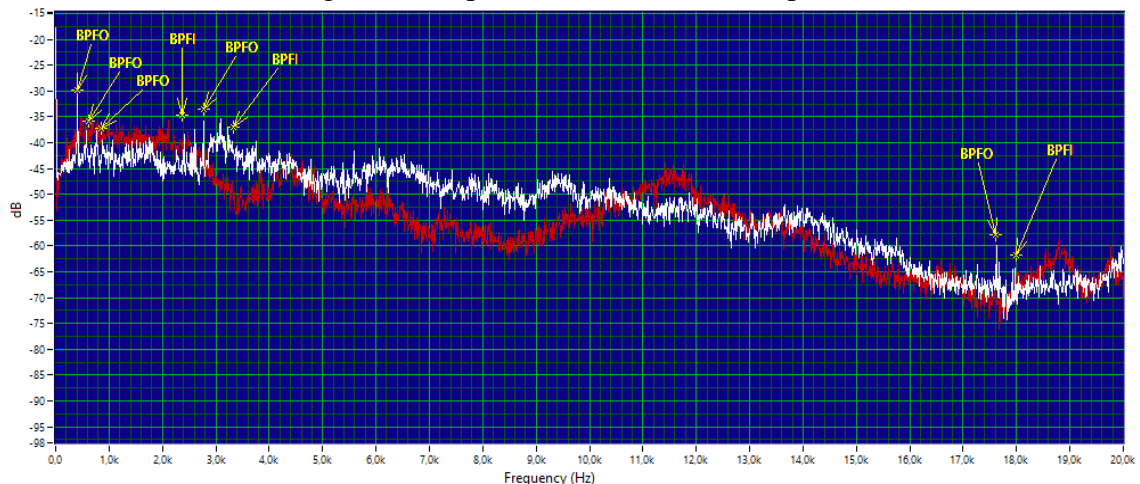


Fuente: Autores

En la (Figura 72). Se observa cómo evoluciona el fallo de un rodamiento con relación a un espectro de línea base de color rojo (rodamiento en buen estado), con una desalineación de 22,7 mrad de desalineación angular al transcurrir el 20% (20min) del 100% (90min) del tiempo en el cual sobrepasa el nivel de severidad.

Se evidencia como se hace visible armónicos de altas frecuencias correspondiente a la pista externa en banda de los 17 a 18 kHz y como empieza a generar ruido por motivo de la desalineación angular ya que el espectro supera la línea base aumentando de manera considerable la amplitud a esta evolución en el espectro de ultrasonido se considera como etapa 2.

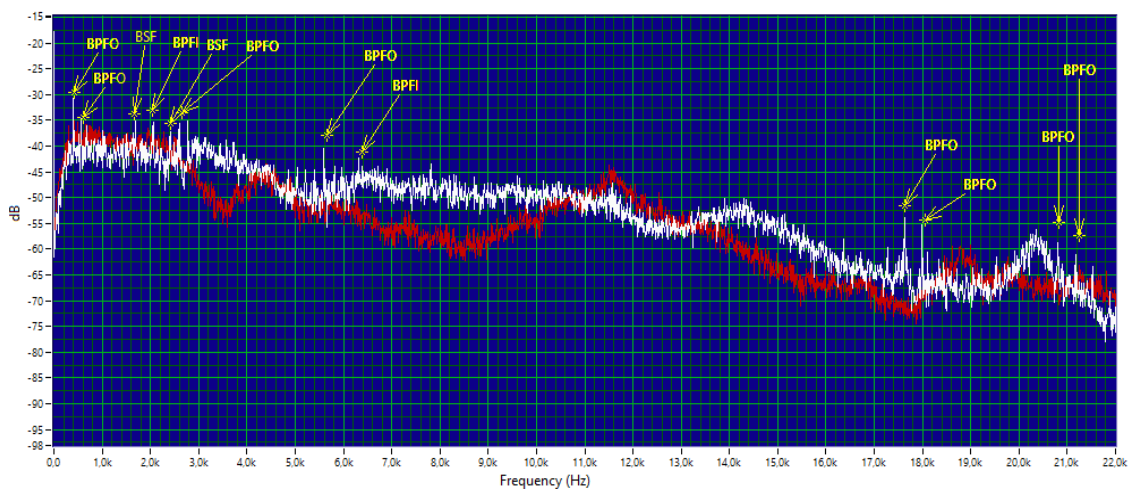
Figura 73. Espectro de ultrasonido Etapa 3.



Fuente: Autores

En la (Figura 73), se observa el desarrollo de picos en alta frecuencia (17-18 kHz) para pista externa e interna así como picos en frecuencias hasta los 5 kHz las cuales se van desarrollando a medida que transcurre el tiempo de ensayo, el cual se detecta al 38% (35min) del 100% (90min) del tiempo en el cual sobrepasa el nivel de severidad, la mayoría de picos pertenecen a frecuencias de fallo de pista externa dando así una idea del componente que empieza a desarrollar problemas debido a la condición de desalineamiento angular a la cual está sometido, esta evolución será considerada como etapa 3.

Figura 74. Espectro de ultrasonido Etapa 4.



Fuente: Autores

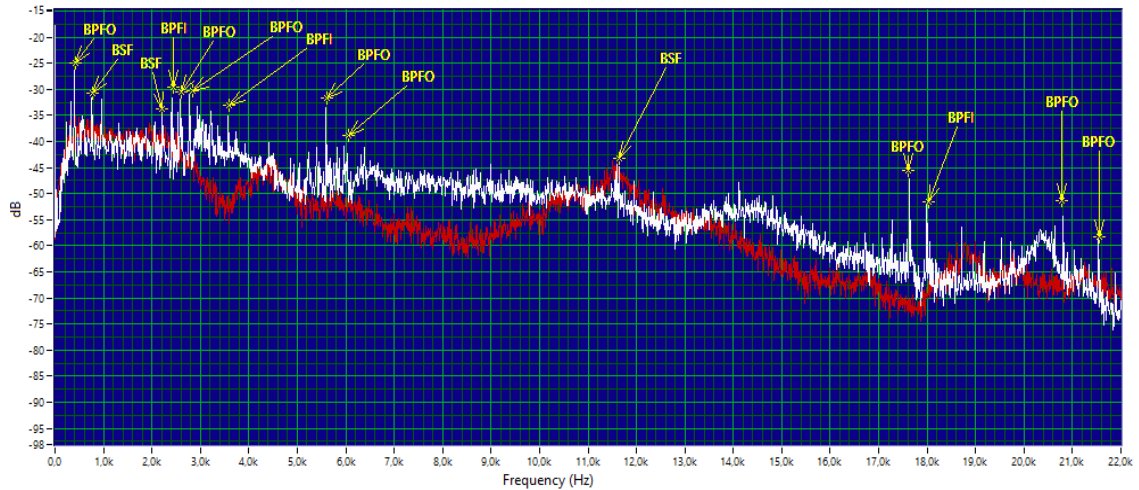
En la (Figura 74), se muestra el incremento de picos tanto en alta frecuencia (17-18 kHz) como en baja frecuencia al transcurrir el 75% (83,33min) del 100% (90min) del tiempo en el cual sobrepasa el nivel de severidad.

En su mayoría correspondientes a pista externa, además se hacen presentes picos en frecuencias de pista interna, en esta etapa se empiezan a desarrollar algunos picos en frecuencia característica de elemento rodante, también se hace evidente como el espectro correspondiente a este tiempo del ensayo sobrepasa en nivel general al espectro de línea base, por lo tanto esta etapa se considerará como etapa 4.

En la (Figura 75), se muestra como los picos en frecuencia característica de pista externa, interna, elemento rodante y jaula han sobrepasado los límites de severidad referencial enunciados en la (Tabla 17) suministrada por el fabricante, transcurrido el 100% (90min) del tiempo en el cual sobrepasa el nivel de severidad, además se nota

como el nivel general de amplitud de este espectro sobrepasa el nivel de línea base, esta evolución se considerara como etapa 5.

Figura 75. Espectro de ultrasonido Etapa 5.



Fuente: Autores

5.6 Comparación y diagnóstico mediante valores globales de vibración RMS.

El fabricante del equipo de Vibraciones utilizado en la presente investigación da como referencia un valor máximo de vibración RMS de 1,5 g el cual se utilizara para evaluar la condición final después del ensayo mediante el RMS de cada uno de los espectros capturados.

UE System fabricante del equipo de ultrasonido utilizado en esta investigación ofrece una tabla referencial para incremento de decibeles en rodamientos, la cual sirve para evaluar la condición en la que se encuentra el elemento estudiado de acuerdo a su incremento de amplitud expresado en decibeles.

Tabla 17. Tabla referencial para evaluar estado de condición en rodamientos.

UE System Tabla de Referencia de Severidad	
Condición	Nivel de Incremento [dB]
Pre falla	8
Inicio de Falla	10-12
Estado de Falla	13- 16
Estado Catastrófico	17-34
Falla Catastrófica	35-50

Fuente: UE System

5.6.1 Análisis mediante el valor RMS de vibración total en Aceleración

5.6.1.1 Análisis para 5,2 mrad a 100% del tiempo total de ensayo.

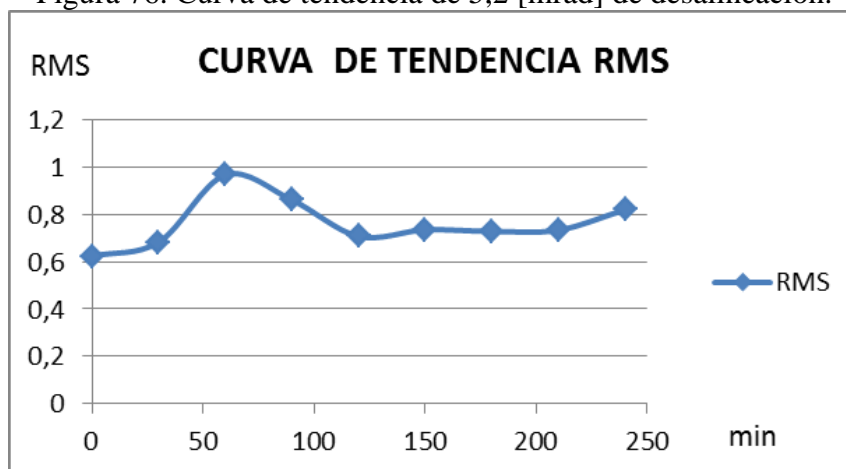
Tabla 18. Valores de RMS para vibraciones (Aceleración).

Vibraciones en Aceleración	
5,2 mrad de desalineación	
4 horas de Ensayo	
Tiempo[min]	RMS[g]
0	0,6239
30	0,6828
60	0,9667
90	0,8604
120	0,7071
150	0,7347
180	0,7282
210	0,7334
240	0,8201

Fuente: Autores

En la (Tabla 18), se observa los valores de aceleración RMS para 5,2 mrad los cuales al transcurrir el tiempo de ensayo el valor máximo para RMS en aceleración es de 0,8201 g, siendo este valor menor que el valor máximo de vibración que nos proporciona IDEAR el cual es de 1,5 g indicando así que el rodamiento aún se encuentra en buenas condiciones.

Figura 76. Curva de tendencia de 5,2 [mrad] de desalineación.



Fuente: Autores

En la (Tabla 19). Referente al incremento de amplitud, se observa que en frecuencia de pista externa existe un incremento de 9,51 dB lo cual indica un pre fallo si tomamos como referencia a la tabla referencial que nos proporciona UE System en la cual nos indica los incrementos en los decibeles partiendo de una línea base que corresponde a un espectro en buen estado de funcionamiento, para el resto de componentes se nota un incremento medido sin llegar a la pre falla.

Tabla 19. Incremento de amplitud para 5,2 mrad de desalineación.

Referencia	Amplitud [dB]
BFFO	9,51
BPFI	0,54
FTF	2,00
BSF	4,69

Fuente: Autores

5.6.1.2 Análisis para 10,4 mrad a 100% del tiempo total del ensayo.

En la (Tabla 20). Se muestran los valores de vibración RMS para una desalineación de 1mm los cuales en el valor máximo para el tiempo de ensayo se muestra en 0,6619 g, estando este valor por debajo del valor máximo recomendado por IDEAR que es de 1,5 g indicando así que el rodamiento aún está en condiciones de operar ya que se aproxima pero no supera.

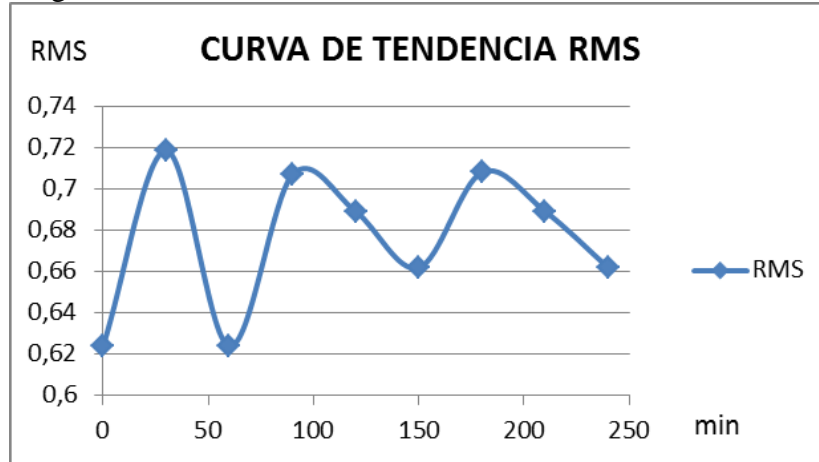
Tabla 20. Valores de RMS para vibraciones (Aceleración).

Vibraciones en Aceleración	
10,4 mrad de desalineación	
4 horas de Ensayo	
Tiempo[min]	RMS[g]
0	0,6239
30	0,7187
60	0,6239
90	0,707
120	0,6892
150	0,6619
180	0,7082
210	0,6892
240	0,6619

Fuente: Autores

Se construye unas curvas de tendencia de los valores de vibración global RMS[g], el cual no sobrepasa el valor de severidad que es de 1,5 g el cual nos proporciona IDEAR como valor máximo permitido, realizada en el tiempo que duró el ensayo.

Figura 77. Curva de tendencia de 10,4 mrad de desalineación.



Fuente: Autores

Los valores mostrados en la (Tabla 21). Comparados con la (Tabla 17). Referencial, muestran un inicio de falla en pista externa (BPFO) y un estado de falla para elemento rodante (BSF) de acuerdo al incremento de dB desde una línea base indicada que se encuentra en la etapa de pre falla, a diferencia del análisis de vibración con la técnica de ultrasonido ya presenta valores que sobrepasan los límites y en vibración se aproxima pero no sobrepasa lo cual hace que esos valores de severidad para vibraciones pasen desapercibidos y no se pueda tomar alguna acción.

Tabla 21. Incremento de amplitud para 10,4 mrad de desalineación.

Referencia	Amplitud [dB]
BPFO	12,41
BPFI	3,68
FTF	6,57
BSF	14,07

Fuente: Autores

5.6.1.3 Análisis para 15,7 mrad de desalineación a 100% del tiempo total del ensayo.

En la (Tabla 22) figuran los valores RMS totales de vibración cuyo valor máximo para el tiempo de ensayo realizado es 0,935 g el cual es menor que el valor máximo

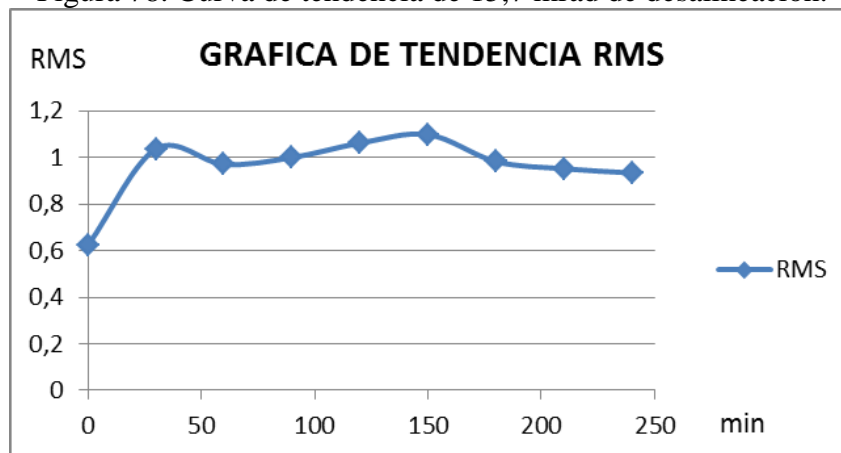
recomendado por IDEAR que es de 1,5 g indicando así que el rodamiento puede seguir operando, sin embargo este seguiría deteriorándose hasta que no se corrija el origen por el cual está desarrollándose la falla teniendo muy en cuenta que este valor máximo de severidad en un dato de referencia.

Tabla 22. Valores de RMS para vibraciones (Aceleración).

Vibraciones en Aceleración	
15,7 mrad de desalineación	
4 horas de Ensayo	
Tiempo[min]	RMS[g]
0	0,6239
30	1,0380
60	0,9715
90	1,0010
120	1,0630
150	1,1000
180	0,9839
210	0,9531
240	0,9350

Fuente: Autores

Figura 78. Curva de tendencia de 15,7 mrad de desalineación.



Fuente: Autores

En la tabla siguiente se muestra un estado de falla para pista externa (BPFO), jaula (FTF) y elemento rodante (BSF), de acuerdo al incremento de los valores máximos del incremento de los decibeles desde su línea base la cual hace referencial (Tabla 17), a partir de los 8 dB existe ya un pre fallo en el rodamiento.

Tabla 23. Incremento de amplitud para 15,7 mrad de desalineación.

Referencia	Amplitud [dB]
BFFO	14,24
BPFI	5,19
FTF	14,31
BSF	14,39

Fuente: Autores

5.6.1.4 *Análisis para 22,7 mrad a 100% del tiempo total del ensayo.*

Los valores mostrados en la (Tabla 24). Correspondientes a la vibración total RMS muestran como valor máximo 1,53 g para el tiempo total del ensayo siendo este mayor que el valor máximo recomendado por IDEAR que es de 1,5 g, indicando así que existe un problema en el elemento rodante y que se debe realizar una corrección inmediatamente el origen de la falla, si nos damos cuenta el análisis de vibración con la misma desalineación detecta en un tiempo mayor que el de ultrasonido pasivo asiéndole menos efectivo.

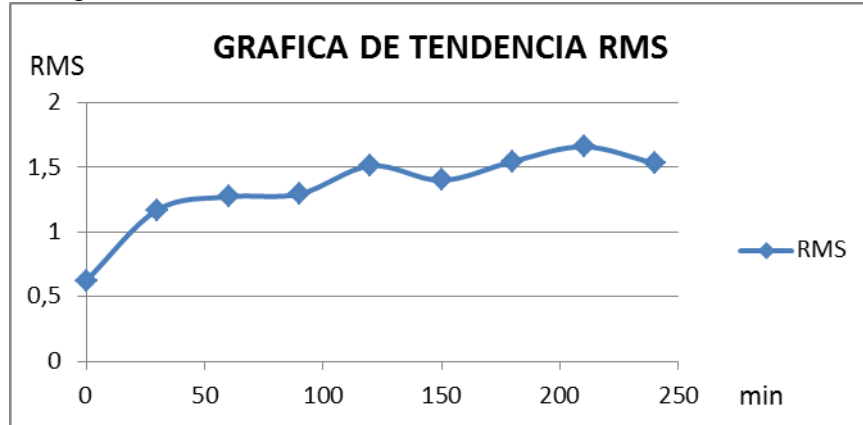
Tabla 24. Valores RMS para vibraciones (Aceleración).

Vibraciones en Aceleración	
22,7 mrad de desalineación	
4 horas de Ensayo	
Tiempo[<i>min</i>]	RMS[<i>g</i>]
0	0,6239
30	1,1710
60	1,2730
90	1,2940
120	1,5120
150	1,4000
180	1,5460
210	1,6600
240	1,5300

Fuente: Autores

Se puede apreciar que el incremento del valor RMS tiende al incremento como se observa en la curva de tendencia, al transcurrir 120 minutos del ensayo con la mayor de la desalineación que es de 22,7 mrad.

Figura 79. Curva de tendencia de 22,7 mrad de desalineación.



Fuente: Autores

Tabla 25. Incremento de amplitud para 22,7 mrad de desalineación.

Referencia	Amplitud [dB]
BFFO	19,20
BPFI	12,41
FTF	13,58
BSF	14,18

Fuente: Autores

En la (Tabla 25). Se muestra el incremento de dB sufrido por el rodamiento cuyos valores comparados con la (Tabla 17), referencial indican un estado catastrófico inicial para pista externa (BFFO), inicio de falla para pista interna (BPFI), estado de falla para jaula (FTF) y elemento rodante (BSF).

5.7 Discusiones finales

Una vez desarrollada la presente investigación vale resaltar la importancia del dominio de frecuencia en el estudio de fallos incipientes en rodamientos, así como la técnica de envolvente de vibración es de mucha utilidad para determinar lo que está sucediendo con las frecuencias características del rodamiento presentes en baja frecuencia, el método de análisis de vibraciones en la detección de fallos incipientes demostró ser muy útil, aun así es necesario el uso de técnicas adicionales como envolvente de vibración para poder realizar un estudio puntual referente a frecuencias características de los elementos del rodamiento, ya que en el espectro normal de vibración se dificulta la visualización de las frecuencias características antes mencionadas.

El análisis de fallos incipientes en rodamientos toma mayor claridad al ser estudiado con el método de diagnóstico de análisis de ultrasonido, el cual permite de una manera más sencilla y confiable determinar, evaluar y llegar a diagnosticar su severidad de deterioro, teniendo en cuenta algunos parámetros como rpm de funcionamiento, número de elementos rodantes, parámetros los cuales son de vital importancia al momento de determinar las frecuencias características de los componentes del rodamiento. Ambas técnicas podrían dar excelentes resultados al ser combinadas durante el estudio de fallos incipientes en rodamientos.

Como se pudo comprobar la técnica de vibraciones es muy útil en la detección de fallos incipientes en rodamientos, aun así al realizar el análisis basándose en la tabla referencial de severidad suministrada por el fabricante del equipo *Vibrachek 200*, se puede evidenciar como este valor de vibración global RMS en aceleración es muy alto y aun cuando se estén dando fallos en el rodamiento estos pasaran desapercibidos.

Por tal razón este indicador no es muy fiable al momento de determinar el estado de condición en el cual se encuentra un rodamiento, mucho menos nos permite saber cuál es el componente del rodamiento que está generando la falla en caso de manifestarse una condición anormal de funcionamiento.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones.

El estudio de algunos aspectos importantes sobre los rodamientos como su clasificación, aplicaciones, partes constitutivas, permite para tener una idea clara sobre los cambios que pueden sufrir al someterlos a desalineación angular.

Dado el objetivo propuesto al inicio de esta investigación, se puede afirmar que se ha podido diseñar y construir un módulo en el cual se puede estudiar de forma comparativa rodamientos en buen estado con otros que se encuentren con fallas o en condiciones fuera de lo común, tomando en cuenta la operatividad y sobre todo la facilidad de manejo, montaje de dispositivos de diagnóstico, toma de datos etc.

Se analizó las mediciones tanto de análisis de vibraciones como de ultrasonido tomando en cuenta la variable de modificación (Desalineación angular controlada), así como los puntos de medición más adecuados para obtener datos más exactos para el estudio.

Se determinó los tiempos necesarios en la recolección de datos mediante el uso del software MAINtraq Viewer en el caso de análisis de vibraciones y el software integrado en el equipo de ultrasonido, cuyos datos fueron necesarios para la determinación de la evolución por etapas de fallas incipientes.

Se estableció por medio de etapas tanto para el análisis de vibraciones como para ultrasonido pasivo, la evolución que presenta los fallos incipientes en los rodamientos, esto se pudo realizar mediante el estudio minucioso de los espectros característicos.

Se concluyó mediante el análisis de los datos obtenidos, que la técnica de ultrasonido pasivo es más efectiva en la detección de fallas incipientes en rodamientos que la técnica de análisis de vibraciones, aun así la técnica de vibraciones nos permite ver en su espectro la evolución de la falla con mayor claridad, no así la técnica de ultrasonido pasivo.

6.2 Recomendaciones.

Siempre que se quiera realizar monitoreo con equipo de ultrasonido, recordar realizar las mediciones con los mismos parámetros con los cuales se realizó la medida de línea base, para de esta manera obtener un análisis más exacto de las condiciones del activo a monitorear.

Al realizar análisis de Vibraciones para determinar fallas incipientes o fallas desarrolladas en rodamientos, aplicar la técnica de envolvente para poder observar con mayor claridad la variación de las amplitudes de las frecuencias de fallas características de los elementos del rodamiento.

Al momento de realizar ensayos de vibraciones o ultrasonido en el módulo de desalineación controlada, procurar realizar los ajustes necesarios en todas las partes del módulo para evitar la presencia de armónicos no deseados en el espectro capturado.

Utilizar el módulo adecuado para el equipo ultrasonido al momento de realizar un ensayo, tomando en cuenta la aplicación a desarrollar para que las medidas sean las más exactas posibles.

Para futuras investigaciones se recomienda realizar el análisis detallado por etapas de otros modos de falla que se desarrollan en diferentes áreas, no solo en lo referente a lo mecánico sino también en áreas como la eléctrica, distribución para aire comprimido o vapor, lubricación con el objetivo de intervenir el activo antes de que se produzca en el una falla catastrófica.

BIBLIOGRAFÍA

A-MAQ. 2005. Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico. *www.a-maq.com*. [En línea] Enero de 2005. *www.a-maq.com*.

CARDONA, Jhon Favio, MONROY, Gustavo y ALVAREZ, Gustavo. 2010. Pereira : Scientia et Technica, 2010. 0122-1701.

CHARLOTTE, TECHNICAL ASSOCIATES OF. 1996. Lista ilustrada de diagnostico de vibraciones. [En línea] 1996.

DONATE, Antonio Hermosa. 2010. *Principios de Electricidad y Electrónica III 2aEd.* Barcelona : Marcombo, 2010.

GARRIDO, Garcia Santiago. 2009. *Tecnicas de mantenimiento condicional basadas en la condicion de variables fisicas.* Madrid : Renovetec, 2009.

<http://www.kc9aop.net>. 2013. <http://www.kc9aop.net>. <http://www.kc9aop.net>. [En línea] 2013. http://www.kc9aop.net/Doc/link_pages/motors_and_mechanical_es.htm#Encontrar_Torque.

IDEAR. 2012. Analizador de vibraciones mecánicas Vibracheck 200. *www.idearnet.com.ar*. [En línea] Junio de 2012. *www.idearnet.com.ar*.

ISO10816-1. 1995. [En línea] 1995.

MARIN, Evelio Palomino. 2005. Envueltos en el dilema de la envolvente. *www.ispjae.cu*. [En línea] 2005.

PETERB, Erick. 2008. ULTRAPROBE 15000 Manual de instrucciones. *www.uesystems.com*. [En línea] 2008.

WHITE, Glen. 1990-2010. *Introducción al analisis de vibraciones.* s.l. : Azima DLI, 1990-2010.

Wikipedia. 2013. Aparatos Eléctricos. [En línea] 2013. [Citado el: 04 de Enero de 2013.] https://es.wikipedia.org/wiki/Aparato_el%C3%A9ctrico.

