



**FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL MECÁNICA**

**ANÁLISIS DE VIBRACIONES MECÁNICAS A FALLAS
INCIPIENTES EN RODAMIENTOS UTILIZANDO LA
TÉCNICA DE LA ENVOLVENTE Y FACTOR CRESTA**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

PROF. GUÍA: FRANCISCO FUENTES

CARLOS GAJARDO CÁCERES

**CURICÓ - CHILE
2022**

CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Two circular stamps and signatures are present. The left stamp is blue and contains the text "UNIVERSIDAD DE TALCA", "DIRECCIÓN", "SISTEMA DE BIBLIOTECAS", and "BIBLIOTECAS". A signature is written over it. The right stamp is grey and contains the text "UNIVERSIDAD DE TALCA", "SISTEMA DE BIBLIOTECAS", "CAMPUS CURICO", and "BIBLIOTECAS". A signature is written over it.

Curicó, 2023

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a mi familia por su apoyo incondicional durante este proceso, a mis padres por siempre alentarme a seguir adelante, a mis hermanas, por su apoyo y comprensión.

Agradecer a mi profesor guía Francisco Fuentes por darme la oportunidad de realizar esta memoria y al profesor Leonardo Albornoz por su disposición y apoyo.

DEDICATORIA

Esta memoria está dedicada a mi familia quienes siempre me han apoyado.

RESUMEN

Los componentes rotativos de la maquinaria son de vital importancia para su funcionamiento, si estos fallan se producen grandes pérdidas productivas y económicas. Una forma de anticiparse a la falla total de rodamientos es a través del monitoreo y análisis de vibraciones.

Poder anticiparse a una falla catastrófica que genere daños al resto del equipo y tomar decisiones es la finalidad del monitoreo de condiciones, en la presente memoria se abordará el análisis vibratorio en los elementos rodantes del equipo de simulación de vibraciones Machine Fault Simulator.

El desarrollo de la presente memoria se realizará analizando el comportamiento vibratorio de los elementos rodantes del equipo de simulación Machine Fault Simulator, mediante herramientas de monitoreo de condición de SKF como lo son el dispositivo de adquisición de datos microlog analyser, y el software de análisis aptitude analyst se realizará un análisis frecuencial para determinar si el equipo presenta daño en sus elementos rodantes, luego de esto el análisis se centrará en el rodamiento lado libre del eje el cual será denominado D2, este rodamiento será desmontado y se le realizará una falla en uno de sus elementos rodantes, lo cual simulará la aparición de una falla incipiente, en estas condiciones de operación se analizará el espectro vibratorio y será analizado mediante la norma ISO 2372 para clasificar la severidad del daño y poder dar un diagnóstico operativo de la condición del equipo.

El contar con instrumentos de análisis adecuados para medir la condición operativa de un equipo es primordial para asegurar el correcto funcionamiento de los mismos, llevar un monitoreo constante permite conocer el estado real de funcionamiento de los componentes, con lo cual se puede anticipar a la falla de estos. El utilizar técnicas como la envolvente de la aceleración, factor cresta y análisis espectral permiten tomar decisiones oportunas.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
RESUMEN.....	iv
ÍNDICE GENERAL.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. ANTECEDENTES.....	2
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.3. SOLUCIÓN PROPUESTA.....	3
1.4. OBJETIVOS.....	4
1.4.1. Objetivo general.....	4
1.4.2. Objetivos específicos.....	4
1.5. RESULTADOS ESPERADOS.....	4
1.6. METODOLOGÍA.....	5
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1 MANTENIMIENTO.....	8
2.1.1 Mantenimiento correctivo.....	8
2.1.2 Mantenimiento preventivo.....	8
2.1.3 Mantenimiento predictivo.....	9
2.1.3.1 Vigilancia de máquinas.....	9
2.1.3.2 Diagnóstico de fallas.....	9
2.1.3.3. Pronóstico de vida.....	9

2.2 Vibraciones mecánicas	10
2.2.1 Tipo de vibraciones	10
2.2.1.1. Vibración armónica libre	10
2.2.1.2. Modelo matemático para la vibración libre	12
2.2.1.3 Vibración libre no amortiguada	13
2.2.1.4. Vibración libre amortiguada	14
2.3 Medición de vibraciones	16
2.3.1 Análisis de la vibración en el dominio del tiempo y dominio frecuencias	17
2.3.2 Análisis frecuencial o espectral	17
2.3.3 Análisis de espectro vibratorio	19
2.3.4 Puntos que se deben identificar para realizar el diagnóstico	20
2.4 TÉCNICAS DE MEDICIÓN	20
2.4.1 Etapas de medición	21
2.4.1.1 Etapa transductora	21
2.4.1.2 Etapa de acondicionamiento	23
2.4.1.3 Filtros	23
2.4.2 Medición	24
2.4.2.1 Medidor de vibraciones	24
2.4.2.2 Analizador de vibraciones	24
2.4.2.3. Transformada rápida de Fourier	24
2.4.3 Análisis	26
2.4.3.1 Técnica de la envolvente	26
2.4.3.2 Factor cresta	27
2.5 CONDICIÓN MECÁNICA DE UN RODAMIENTO	27
2.5.1 Vida útil de un rodamiento	27

2.5.2 Daños generados por vibraciones en rodamientos	28
2.6 EQUIPO DE PRUEBAS MACHINE FAULT SIMULATOR	31
2.6.1 Componente a estudiar	32
2.6.1.1. Clasificación de los rodamientos	32
2.7 SEVERIDAD VIBRATORIA	36
2.8 NORMAS DE EVALUACIÓN	37
2.8.1 Norma ISO 10816-3	37
2.8.1.1 Clasificación de las maquinas potencia o altura de eje	39
2.8.1.2 Clasificación según la flexibilidad del soporte.....	39
2.8.2 Norma ISO 2372.....	40
CAPÍTULO 3. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN A LA PROBLEMÁTICA	42
3.1 CONFIGURACIONES GENERALES	43
3.1.1 Definición de variables a utilizar.....	43
3.2 Equipamiento a utilizar.....	43
3.2.1 Microlog analyser	43
3.2.2 Acelerómetro	44
3.2.3 Software de análisis Aptitude Analyst de SKF	45
3.3 Componente a evaluar	46
3.4 CONFIGURACIÓN APTITUDE ANALYST.....	47
3.4.1 Creación de jerarquías	47
3.4.2 Creación de puntos	48
3.5 CONFIGURACIÓN DE PUNTOS DE MEDICIÓN.....	50
3.5.1 Configuración de puntos de velocidad	50
3.5.2 Configuración de puntos de aceleración.....	52
3.5.3 Configuración para los puntos de envolvente de aceleración	55

3.6	OBTENCIÓN DE DATOS	57
3.6.1	Tendencias de vibraciones en los puntos del motor y el eje.....	59
3.6.2	Tendencias de vibraciones en los rodamientos del eje	61
3.7	PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR EL DAÑO AL RODAMIENTO	64
3.8.	ANÁLISIS RODAMIENTO D2 CON FALLA	67
3.9	RESPUESTA VIBRATORIA DEL RODAMIENTO	70
3.9.1	Análisis espectral del rodamiento D2 antes de la falla	70
3.9.2	Análisis espectral del rodamiento D2 con falla.....	71
3.10	Análisis de fallas utilizando la técnica de la envolvente	73
3.11	FACTOR CRESTA	75
3.12	Severidad vibracional del rodamiento con y sin fallas a través de la norma ISO 2372.....	77
3.12.1	Severidad vibracional del rodamiento	79
3.11	INFORME DIAGNÓSTICO DE FALLOS PARA EL ANÁLISIS OBTENIDO DE VIBRACIONES REALIZADA AL EQUIPO MACHINE FAULT SIMULATOR.	81
CAPÍTULO 4.	ANÁLISIS DE resultados	83
4.1	análisis espectral de las mediciones	84
4.2	ANÁLISIS DE LA TÉCNICA DE LA ENVOLVENTE Y FACTOR CRESTA.....	88
4.2.1	Técnica de la envolvente	88
4.2.2	Factor cresta.....	89
	CONCLUSIONES.....	90
	REFERENCIAS	93
	ANEXOS	95
	ANEXO 1: ESPECIFICACIONES RODAMIENTO	95
	ANEXO 2: Ficha técnica acelerómetro	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Esquema de vibraciones. Fuente (Saavedra, 2009).....	10
Figura 2.2: Sistema masa resorte. Fuente: (Saavedra, 2009).....	11
Figura 2.3: Representación básica del movimiento armónico. Fuente: (Hall, Holowenko, & Laughlin, 1971).	12
Figura 2.4: Respuesta vibratoria del sistema de vibración libre no amortiguada. Fuente (Daza, 2007).....	14
Figura 2.5: Tipos de vibración captadas por los sensores. Fuente: (Saavedra, 2009).....	17
Figura 2.6: Espectro de los descansos de una bomba de agua sin lubricación. Fuente: (Lavanderos, 2013).....	18
Figura 2.7: Espectro de vibraciones de los descansos de una bomba lubricados. Fuente: (Lavanderos, 2013).....	19
Figura 2.8: Componentes del espectro de vibraciones. Fuente: (Lavanderos, 2013).....	20
Figura 2.9: Formas de medir la amplitud vibratoria. Fuente: (Reyes & Galleguillos, 2014)....	21
Figura 2.10: Esquema de funcionamiento de un sensor de desplazamiento. Fuente: (Daza, 2007).....	22
Figura 2.11: Tipos de sensores de aceleración. Fuente: (Daza, 2007).	23
Figura 2.12: Esquema del procedimiento de transformación de la señal. Fuente: (Companioni, 2016).....	25
Figura 2.13: Espectro de vibraciones para las distintas etapas. Fuente: (Daza, 2007).....	30
Figura 2.14: Simulador Machine fault simulator. Fuente: (Perez J., 2017)	31
Figura 2.15: Contacto de los rodamientos con el aro interno. Fuente: (SKF, 2019).....	32
Figura 2.16: Cargas en un rodamiento. Fuente: (SKF, 2017).....	33
Figura 2.17: Componentes de un rodamiento. Fuente (SKF, 2019).....	34
Figura 2.18: Terminología en rodamientos radiales y axiales. Fuente (SKF, 2019).....	35
Figura 2.19: Dimensiones del rodamiento ER12K. Fuente: (REXNORD).....	35
Figura 2.20: Tabla de severidad 10816 según el tipo de máquina. Fuente: (ISO, 1995)	40
Figura 3.1: Dispositivo de adquisición de datos, microlog analyser. Fuente: Elaboración propia	44
Figura 3.2: Acelerómetro piezoeléctrico. Fuente: Elaboración propia.....	45

Figura 3.3: Ventana principal del software Aptitude analyst. Fuente: Elaboración propia.....	46
Figura 3.4: Rodamiento abierto sin sello de contaminación. Fuente: elaboración propia.....	47
Figura 3.5:Ubicación de puntos de medición en el equipo. Fuente: Elaboración propia	49
Figura 3.6: Configuración de puntos de velocidad. Fuente: Elaboración propia	51
Figura 3.7: Pestaña de configuración de puntos de velocidad. Fuente: Elaboración propia	51
Figura 3.8: Configuración de alarmas para los puntos de velocidad. Fuente: Elaboración propia	52
Figura 3.9: Pestaña para la creación del punto de aceleración. Fuente: Elaboración propia.....	53
Figura 3.10: Pestaña de configuración de puntos de aceleración. Fuente: elaboración propia	54
Figura 3.11:Configuración de las alarmas para los puntos de aceleración. Fuente: elaboración propia	55
Figura 3.12:Pestaña para configurar los puntos de la envolvente. Fuente: elaboración propia	56
Figura 3.13: Configuración de los puntos de la envolvente. Fuente: elaboración propia	56
Figura 3.14: Configuración de alarmas para los puntos de envolvente. Fuente: elaboración propia	57
Figura 3.15:Carcasa abierta para retirar el rodamiento. Fuente: elaboración propia	65
Figura 3.16: Rodamiento con los elementos rodantes a la vista. Fuente: Elaboración propia	66
Figura 3.17: Elemento rodante sin daño superficial. Fuente: Elaboración propia	66
Figura 3.18: Elemento rodante dañado en su superficie. Fuente: elaboración propia.....	67

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1: Desplazamiento versus tiempo. Fuente (http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu , 2022).....	11
Gráfico 2.2: Tipos de amortiguamiento. Fuente: (Rao, 2012).....	16
Gráfico 3.1: Gráfico de tendencia de velocidad mm/s-RMS punto lado libre del motor. Fuente: Elaboración propia.....	59
Gráfico 3.2: Gráfico de tendencia de velocidad mm/s-RMS punto lado acoplamiento del motor M2H. Fuente: Elaboración propia	60
Gráfico 3.3: Gráfico de tendencia de velocidad mm/s-RMS descanso lado acoplamiento D1 . Fuente: Elaboración propia.....	61
Gráfico 3.4: Gráfico de tendencia de velocidad mm/s-RMS descanso lado libre D2. Fuente: Elaboración propia.....	62
Gráfico 3.5: Tendencia en aceleración g-RMS para el descanso lado libre D2. Fuente: elaboración propia.	63
Gráfico 3.6: Espectro de aceleración del rodamiento dañado obtenido del software microlog analyser. Fuente: elaboración propia	68
Gráfico 3.7: Gráfico espectro de aceleración rodamiento D2 sin falla. Fuente: elaboración propia	70
Gráfico 3.8: espectro vibratorio del rodamiento D2 con falla. Fuente: elaboración propia.	72
Gráfico 3.9: Estado del rodamiento a través del tiempo. Fuente: elaboración propia.....	73
Gráfico 3.10: tendencia obtenida de las mediciones realizadas con el filtro de la envolvente para las distintas mediciones realizadas al rodamiento D2.	75
Gráfico 3.11: Tendencia en aceleración rodamiento D2 hasta la aparición de la falla incipiente. Fuente: elaboración propia.	80
Gráfico 4.1: Espectro de tendencias en velocidad del rodamiento lado libre motor (M1H). Fuente: elaboración propia	84
Gráfico 4.2: Espectro de tendencias en velocidad del rodamiento lado acoplamiento motor (M2H). Fuente: elaboración propia	85
Gráfico 4.3: Espectro de tendencias en velocidad del descanso lado acoplamiento motor (D1H). Fuente: elaboración propia.....	85

Gráfico 4.4: Espectro de tendencias en velocidad del descanso lado libre (D2H). Fuente:
elaboración propia86

Gráfico 4.5: Aparición de falla incipiente en el descanso D2. Fuente: Elaboración propia.....87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Dimensiones principales del rodamiento. Fuente: (Rexnord, 2022).....	36
Tabla 2.2: Especificaciones técnicas del rodamiento. Fuente: (Rexnord, 2022).....	36
Tabla 2.3: Clasificación de las máquinas. Fuente: (Saavedra, Tutorial severidad vibratoria Parte 1).....	40
Tabla 2.4: Tabla de severidad norma ISO 2372. Fuente: (Saavedra, Curso Análisis de vibraciones de máquinas rotatorias nivel I, 2009).....	41
Tabla 3.1: Condiciones de funcionamiento del equipo machine fault simulator. Fuente: Elaboración propia.....	43
Tabla 3.2: Nomenclatura rodamiento ER12 K. Fuente (REXNORD)	47
Tabla 3.3: Puntos de medición. Fuente: Elaboración propia.....	48
Tabla 3.4: Configuración de puntos de velocidad. Fuente: Elaboración propia.....	51
Tabla 3.5: Configuración de alarmas para puntos de velocidad. Fuente: (Barahona, 2017).....	52
Tabla 3.6: Configuraciones generales para los puntos de aceleración. Fuente: elaboración propia.....	53
Tabla 3.7: Configuración de alarmas para puntos de aceleración. Fuente (Barahona, 2017) ...	54
Tabla 3.8: Configuración de alarmas para puntos de envolvente de aceleración. Fuente: (Barahona, 2017).	57
Tabla 3.9: Resumen de las mediciones de velocidad mm/s – RMS de cada punto. Fuente: Elaboración propia.....	58
Tabla 3.10: Amplitudes de las mediciones realizadas para el rodamiento M1H. Fuente: elaboración propia	59
Tabla 3.11: Tendencia velocidad en el punto lado acoplamiento del motor Fuente: Elaboración propia.....	60
Tabla 3.12: Amplitudes de las mediciones realizadas para el descanso D1 en la dirección horizontal Fuente: elaboración propia	62
Tabla 3.13: Amplitudes de las mediciones en velocidad realizadas para el descanso D2 en la dirección horizontal Fuente: elaboración propia	63
Tabla 3.14: Amplitudes de cada medición realizada en el descanso lado libre D2. Fuente: elaboración propia	64

Tabla 3.15: Amplitudes de los puntos de aceleración del rodamiento D2 con falla. Fuente: elaboración propia	69
Tabla 3.16: Comparación de las frecuencias obtenidas directamente del software y las frecuencias obtenidas de la ecuación 22. Fuente: elaboración propia.....	69
Tabla 3.17:Tabla correspondiente a las frecuencias y amplitudes del espectro de aceleración del rodamiento D2 sin falla. Fuente: elaboración propia.....	70
Tabla 3.18: Comparación frecuencias rodamiento sin falla y frecuencias obtenidas por fórmula. Fuente: elaboración propia.....	71
Tabla 3.19:Amplitudes de los puntos de aceleración del rodamiento D2 con falla. Fuente: elaboración.....	72
Tabla 3.20: Tabla comparativa de las frecuencias y amplitudes antes y después de la falla. Fuente: elaboración propia	72
Tabla 3.21: Tabla de valores de velocidad rodamiento D2. Fuente: elaboración propia	75
Tabla 3.22: Resumen valores RMS y factor Cresta antes y después de la falla. Fuente: Elaboración propia.....	76
Tabla 3.23: Valores de velocidad globales del rodamiento D2 utilizados para calcular el valor RMS. Fuente: elaboración propia	78
Tabla 3.24: Resumen condiciones del equipo para evaluar severidad. Fuente: elaboración propia	79
Tabla 3.25:Tabla de severidad para clasificar el componente analizado. Fuente: (Saavedra, Curso Análisis de vibraciones de máquinas rotatorias nivel I, 2009)	79
Tabla 3.26: Amplitudes en aceleración del rodamiento D2. Fuente: elaboración propia	80
Tabla 4.1: Amplitudes y frecuencias del rodamiento antes y después de la falla	87
Tabla 4.2:Amplitudes globales en aceleración g – RMS del rodamiento D2. Fuente: Elaboración propia.....	88

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

En la escuela de Ingeniería Civil Mecánica de la Universidad De Talca se encuentra el laboratorio de mantenimiento, lugar en el cual se desarrollará el tema de investigación relacionado con el análisis de fallas en rodamientos, esta investigación tiene como finalidad dejar documentación formal sobre el análisis vibracional realizado en el equipo de simulación de fallas machine fault simulator, usando la técnica de la envolvente y su posterior análisis con el factor cresta se pretende conocer la severidad del daño en el componente.

El laboratorio de mantenimiento cuenta con el equipamiento necesario para poder realizar este estudio, mediante el software SKF Aptitude Analyst serán almacenados los datos obtenidos de las mediciones de vibraciones del equipo para su posterior análisis, estas mediciones serán obtenidas con el dispositivo de adquisición de datos microlog analyzer.

La información obtenida de las vibraciones en el dominio de la frecuencia permite determinar condiciones anormales en los rodamientos del equipo, con el uso de la técnica de la envolvente se busca detectar zonas resonantes excitadas o moduladas por fuerzas de impacto periódicas, donde su frecuencia de repetición representa un indicador del lugar donde se encuentra el daño, y la amplitud es una medida del defecto y la progresión de la falla (Quiroga, Trujillo, & Quintero, 2012).

Una vez detectada la falla, se analizará con el factor cresta el cual consiste entre la división del valor pico y el valor RMS de la vibración.

1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Los componentes rotativos de la maquinaria son de vital importancia para su funcionamiento, si estos fallan se producen grandes pérdidas de producción lo que conlleva a pérdidas económicas. Una forma de anticiparse a la falla total de rodamientos es a través del monitoreo y análisis de vibraciones, utilizando el factor cresta se pretende estimar la condición en cual se encuentra el rodamiento a través del tiempo, y si la falla influye en un recambio del componente. El uso de rodamiento tarde o temprano desencadena la incógnita de cuándo debe ser reemplazado. Alrededor del mundo aproximadamente 50.000.000 de rodamientos son

reemplazados por daños y fallas, las causas de esto pueden ser variados, como: fatiga, problemas de lubricación, contaminación, otros motivos (SKF, 2017).

Al no contar con un monitoreo constante de los rodamientos es posible que la falla de este se presente de manera imprevista, generando daños a otros componentes del equipo. Para abordar este problema de aparición repentina del fallo se utilizará el equipo machine fault simulator como investigación en laboratorio para establecer el momento exacto en el cual el daño del rodamiento hace necesario un recambio del componente.

El problema a tratar en la presente memoria es que no existe ningún análisis realizado con los equipos de laboratorio anteriormente nombrados, que demuestren la importancia de un análisis vibracional para establecer la condición operativa de un rodamiento en funcionamiento.

1.3. SOLUCIÓN PROPUESTA

Para comprender el estado físico del rodamiento, se realizarán mediciones controladas de las vibraciones de este componente, inicialmente se realizará el análisis de un rodamiento en perfecto estado sin ningún tipo de defecto, seguido de esto, al rodamiento se le realizará un daño en uno de los elementos rodantes, la cual simulará el inicio de la falla, de la misma forma que ocurre en condiciones normales de operación, de esta manera se pretende analizar el nivel de vibraciones que este daño produciría al momento de inicio de la falla.

Al presentar una falla el rodamiento, este tenderá a vibrar, estas vibraciones son representadas en amplitud y frecuencia, utilizando el factor cresta se pretende cuantificar la severidad del daño en función de la energía vibratoria que produjo la falla, de esta manera se puede clasificar el daño en incipiente, medio o avanzado, utilizando la norma ISO 2372, la cual será explicada en el capítulo 2.

Este análisis de rodamiento se llevará a cabo en condiciones de laboratorio ya que el equipo de simulación presenta sus rodamientos con un fácil acceso, haciendo más sencillo su manipulación, a nivel industrial siempre se encuentran en un lugar de difícil acceso y su extracción no es una tarea sencilla, por eso se optó por la primera opción.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Evaluar el diagnóstico de fallas incipientes, realizando el análisis para el rodamiento ER12 K presenten en el equipo de simulación, usando análisis de fallas con la técnica de la envolvente y factor cresta, bajo condiciones de laboratorio.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Estudiar el funcionamiento del equipo de simulación machine fault simulator.
2. Analizar la respuesta vibratoria obtenida de la medición de vibraciones del rodamiento ER12K sin fallas del equipo machine fault simulator.
3. Analizar la respuesta vibratoria obtenida de la medición de vibraciones del rodamiento ER12K con fallas del equipo machine fault simulator.
4. Comparar el estado del rodamiento a través del espectro de vibraciones analizando su estado con la técnica de la envolvente y factor cresta
5. Evaluar la severidad vibracional del rodamiento con y sin fallas a través de la norma ISO 2372.
6. Crear informe tipo de diagnóstico de fallos para el análisis obtenido de vibraciones realizada al equipo machine fault simulator.

1.5. RESULTADOS ESPERADOS

Determinar las frecuencias que presenta el rodamiento ER12K en buen estado, para conocer de manera gráfica el comportamiento espectral del rodamiento al no haber sufrido ningún tipo de daño.

Determinar las frecuencias del rodamiento ER12K con falla, obteniendo información valiosa sobre la situación operacional en la que se encuentra el rodamiento mediante la severidad vibratoria.

Capítulo 1. Introducción

Finalmente se desea conocer mediante análisis de vibraciones, que tan avanzada está la falla dentro del rodamiento utilizando estándares internacionales utilizados para medir vibraciones mecánicas como son la norma ISO 2372.

1.6. METODOLOGÍA

La metodología en esta memoria pretende abordar desde la familiarización con el equipo de fallas, conociendo sus partes y su funcionamiento, hasta analizar el estado del rodamiento bajo la norma ISO 2372.

La forma de obtener los resultados esperados es mediante la secuencia de los siguientes puntos:

1. En primera instancia se debe conocer en profundidad el equipo, los componentes más importantes, manual de funcionamiento, instalación de rodamientos, normas de operación, etc.
2. El primer caso de análisis corresponde a la medición de vibraciones con los rodamientos en perfecto estado, es decir, sin daños ni fallas, este será instalado y se procederá a realizar el análisis vibracional, se realizará un total de 10 mediciones, siendo la última bajo la condición de rodamiento con falla, la obtención de los datos se realizará mediante el programa SKF Aptitude Analyst.
3. Una vez realizado el registro de datos para el rodamiento en perfecto estado, se procede a retirarlo de la máquina, y de forma manual generarle algún tipo de daño que simule el proceso normal de aparición de una falla incipiente para luego volver a instalarlo y medir la respuesta vibratoria para este caso.
4. Una vez obtenida la respuesta vibratoria para cada caso se realizará un estudio comparativo mediante la técnica de la envolvente y factor cresta, de esta manera se pretende saber qué tan severo es el daño del componente y si ya amerita un recambio.

Capítulo 1. Introducción

5. Dejar registro mediante la presente memoria de toda la toma de datos realizada, con el fin de que cualquier persona que lea este documento logre entender el análisis realizado al rodamiento desde su puesta en marcha hasta el momento de su falla.

6. Se realizará un informe tipo de diagnóstico una vez hecho el análisis del espectro de vibraciones, esta carta tiene como finalidad detallar los componentes estudiados, la norma utilizada, instrumentos de medición y el estado final de los rodamientos.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 MANTENIMIENTO

Al referirse a cualquier proceso productivo, es inevitable asociar las averías, roturas, y cualquier tipo de deterioro que se ven sometidos los equipos, por lo tanto, el mantenimiento es la disciplina encargada de maximizar las horas disponibles de funcionamiento de un equipo o instalación, aumentando de esta manera la productividad, considerando todo esto a un costo mínimo (Saavedra, 2009).

2.1.1 Mantenimiento correctivo

El mantenimiento correctivo o también llamado mantenimiento reactivo es realizado cuando algún equipo ha dejado de operar debido a la aparición de alguna falla, el objetivo del mantenimiento correctivo es solucionar la avería dejando el equipo operativo nuevamente (Perez, 2021).

El mantenimiento correctivo se puede clasificar en 2 tipos:

Mantenimiento correctivo no programado: tiene lugar cuando se presenta la falla en el equipo, produciendo su detención, para luego realizar su reparación por el personal de mantenimiento (Perez F. 2021).

Mantenimiento correctivo programado: es realizado cuando se detecta la aparición de la falla en el equipo, de esta manera se programa el mantenimiento para reparar la falla (Perez F. 2021).

2.1.2 Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo realiza reparaciones o cambios de componentes de manera planificada dentro de periodos definidos con anterioridad, su objetivo es garantizar que los activos desempeñen sus funciones dentro de los requerimientos para el que fue diseñado.

Dentro de los objetivos del mantenimiento preventivo se encuentran los siguientes:

Disponibilidad: se define como la probabilidad de que una máquina sea capaz de realizar su trabajo cada vez que se le requiera.

Capítulo 2. Marco teórico

Confiabilidad: corresponde a la probabilidad que la máquina esté operando en cada momento que el usuario lo necesite.

2.1.3 Mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo se encarga de evaluar a través de la medición de síntomas la condición en la que se encuentra el equipo o máquina, de esta manera se pueden identificar problemas que ya tiene la máquina o poder predecir algún tipo de avería que se presentará en el tiempo, de esta manera se puede estimar cuándo realizar acciones correctivas (Saavedra, 2009). La ventaja de realizar un mantenimiento predictivo es detectar la aparición de una falla con antelación y así evitar problemas mecánicos de mayor envergadura, la cuales pueden ser costosas o en el peor de los casos catastrófica (Saavedra, 2009).

El mantenimiento predictivo tiene tres objetivos:

2.1.3.1 Vigilancia de máquinas

Utilizando diferentes técnicas para medir magnitudes físicas como análisis de vibraciones, análisis de aceite, termografía, puede detectar cuando existe un problema en un equipo determinado de esta manera la condición de la máquina (Saavedra, 2009).

2.1.3.2 Diagnóstico de fallas

Cuando se presenta una falla en una máquina los indicadores que se están midiendo cambian su valor, por ejemplo, la amplitud de la energía vibratoria en un rodamiento, por lo tanto, se debe diagnosticar cual es la falla en específico que se ha producido (Saavedra, 2009).

2.1.3.3. Pronóstico de vida

Determina cuánto tiempo más puede operar la máquina una vez detectado una falla en ella (Saavedra, 2009).

2.2 VIBRACIONES MECÁNICAS

El estudio de las vibraciones se refiere a los movimientos oscilatorios de los cuerpos, y a las fuerzas asociadas. Todo cuerpo que posea masa y elasticidad es capaz de vibrar (Thomson, 1981).

Las vibraciones corresponden al movimiento oscilatorio de una máquina, estructura, o algún componente de estos respecto de su posición original, la forma esquemática de representar una vibración de un cojinete se muestra en la figura 2.1.

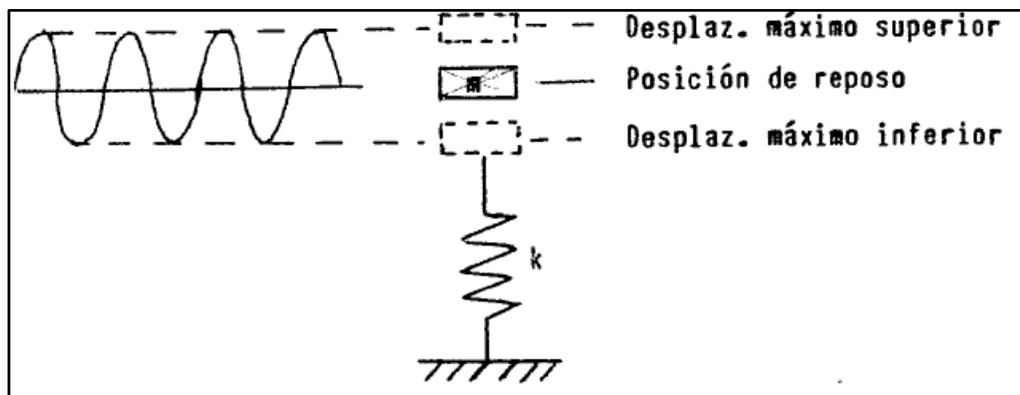


Figura 2.1: Esquema de vibraciones. Fuente (Saavedra, 2009)

2.2.1 Tipo de vibraciones

2.2.1.1. Vibración armónica libre

Este tipo de vibración ocurre cuando un sistema oscila bajo la acción de fuerzas inherentes al sistema mismo y, cuando las fuerzas externamente aplicadas son inexistentes. El sistema bajo vibración libre vibrará a una o más de sus frecuencias naturales que son propiedades del sistema dinámico que depende de su distribución de masa y de rigidez (Thomson, 1981).

Este es el tipo más simple de vibración, este sistema es representado en la figura 2.2 el cual corresponde a un sistema masa- resorte. En la posición de equilibrio, las fuerzas sobre el cuerpo de masa m se anulan y por lo tanto este tiende a permanecer en reposo en esa posición, si el cuerpo se saca de esta posición, desplazándolo a la posición 1, y luego se suelta, el cuerpo vibrará con un movimiento armónico simple (Saavedra, 2009).

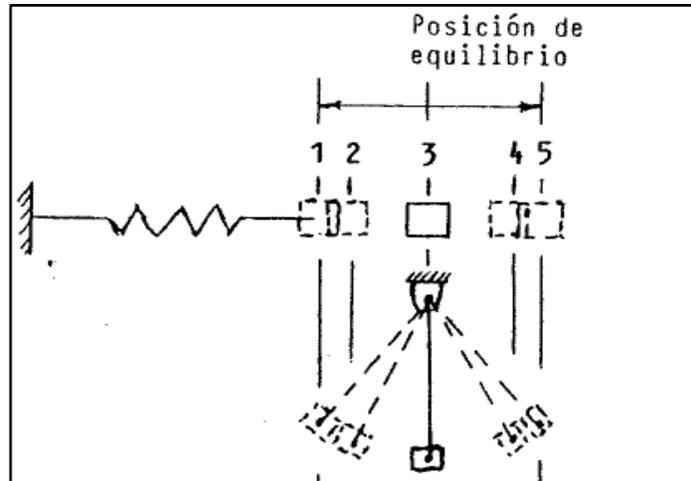


Figura 2.2: Sistema masa resorte. Fuente: (Saavedra, 2009)

Al graficar el desplazamiento en distintos instantes en función del tiempo se obtiene una curva senoidal como se muestra en el gráfico 2.1.

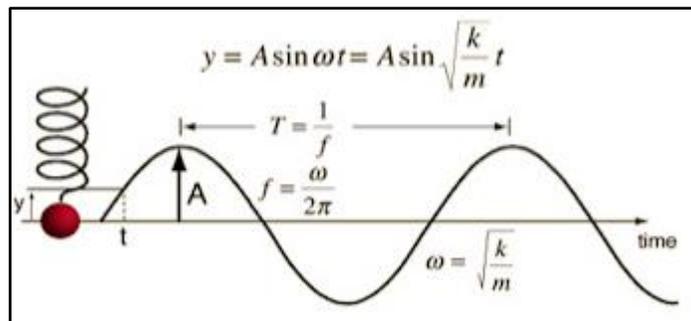


Gráfico 2.1: Desplazamiento versus tiempo. Fuente (<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu>, 2022)

Donde:

A: Corresponde a la amplitud y es el máximo desplazamiento que puede alcanzar el cuerpo desde el punto de equilibrio, también es llamado desplazamiento pico (Saavedra, 2009).

f: frecuencia de vibración, se define como el número de oscilaciones que realiza el cuerpo en cada segundo.

$$f = \frac{\omega}{2 * \pi} \quad (1)$$

Capítulo 2. Marco teórico

T: período de vibración, se define como el tiempo que demora el cuerpo en realizar una oscilación.

$$T = \frac{1}{f} \quad (2)$$

y: corresponde al desplazamiento vibratorio

$$y = A * \text{sen } \omega t = A \text{sen} \sqrt{\frac{K}{m}} t \quad (3)$$

ω : Velocidad angular, es otra manera de expresar la frecuencia f, es expresada en (rad/seg), la relación que existe entre la velocidad angular y la frecuencia se muestra en la ecuación

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (4)$$

2.2.1.2. Modelo matemático para la vibración libre

Este sistema consiste en una masa, un resorte y un amortiguador como se muestra en la figura 2.3.

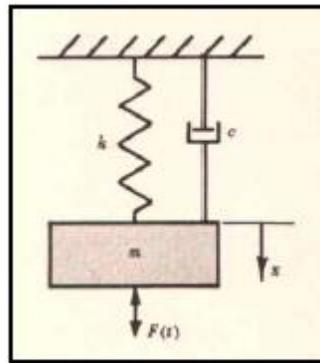


Figura 2.3: Representación básica del movimiento armónico. Fuente: (Hall, Holowenko, & Laughlin, 1971).

La ecuación diferencial que describe este movimiento se muestra a continuación:

Capítulo 2. Marco teórico

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (5)$$

Donde:

m = masa.

k = constante de resorte.

c = constante de amortiguamiento (considerando una amortiguación viscosa, es decir que la fuerza resistente es proporcional a la velocidad).

x = desplazamiento de la masa desde la posición de equilibrio estático.

\dot{x} = derivada primera de x respecto a t .

\ddot{x} = derivada segunda de x respecto de t .

$F(t)$ = fuerza externa cualquiera, en función del tiempo.

2.2.1.3 Vibración libre no amortiguada

Para este caso de vibración no existe amortiguamiento ni excitación, de esta manera $F(t)=0$, $c=0$, por lo tanto, no existe excitación que produzca vibración, la forma que esta se produzca es por condiciones iniciales del sistema, de esta manera la ecuación (5) queda expresada según la ecuación (6) que se observa a continuación:

$$M\ddot{x} + kx = 0 \quad (6)$$

Las expresiones de velocidad y aceleración se muestran en las ecuaciones (7) y (8) respectivamente

$$v(t) = v_0 \text{sen}(\omega_n t + \varphi + \pi) \quad (7)$$

$$a(t) = A_0 \text{sen}(\omega_n t + \varphi + \pi) \quad (8)$$

Donde V_0 y A_0 corresponde a:

$$V_0 = X_0 \omega_n$$

$$A_0 = X_0 \omega_n^2$$

La respuesta vibratoria para el sistema de vibración libre no amortiguada se muestra en la figura 2.4.

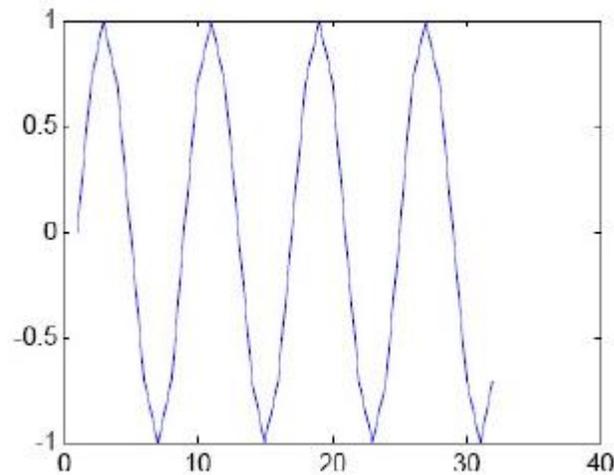


Figura 2.4: Respuesta vibratoria del sistema de vibración libre no amortiguada. Fuente (Daza, 2007)

2.2.1.4. Vibración libre amortiguada

En este caso se posee amortiguamiento, pero no excitación externa, por lo tanto, la ecuación diferencial (9) a resolver es:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (9)$$

Donde:

$$x(0) = x_0$$

$$\dot{x}(0) = \dot{x}_0$$

Su ecuación característica (10) se define como:

$$mr^2 + cr + k = 0 \quad (10)$$

Resolviendo la ecuación algebraicamente la ecuación 11 se obtiene:

$$r_1, r_2 = -\frac{c}{2m} \pm \sqrt{\frac{c^2}{2m} - \frac{k}{m}} \quad (11)$$

El sistema vibrará solo si r tiene valores imaginarios, para que el sistema vibre se debe cumplir la siguiente condición:

$$\frac{k}{m} > \frac{c^2}{2m}$$

Amortiguamiento crítico: corresponde al máximo valor que puede tener c para el sistema vibre, el cual tiene un valor de:

$$c_c = 2\sqrt{km} = 2m\omega_n \quad (12)$$

Se define el factor de amortiguamiento ξ se define en la ecuación (13):

$$\xi = \frac{c}{c_c} \quad (13)$$

Al realizar arreglos matemáticos de la ecuación 12 y al dejar está en función del amortiguamiento se obtiene la ecuación 14

$$r_{1,2} = \omega_n(-1 \pm \sqrt{\xi^2 - 1}) \quad (14)$$

Dependiendo el valor que tome ξ , es el tipo de amortiguamiento que se presentará.

$\xi = 0$ no existe amortiguamiento

$\xi < 1$ existe sub-amortiguamiento

$\xi > 1$ existe sobre-amortiguamiento

$\xi = 1$ existe amortiguamiento critico

En el gráfico 2.2 se muestra la posición dependiendo del tipo de amortiguamiento

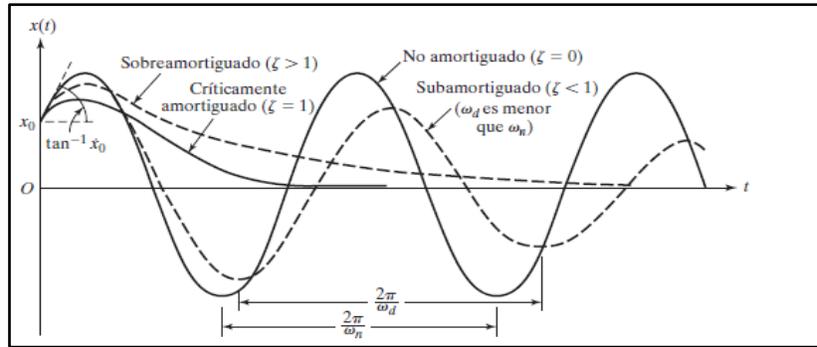


Gráfico 2.2: Tipos de amortiguamiento. Fuente: (Rao, 2012)

2.3 MEDICIÓN DE VIBRACIONES

Se ha descrito la vibración armónica mediante el desplazamiento del cuerpo, de igual manera se puede realizar un análisis vibratorio mediante su velocidad y aceleración.

Una máquina rara vez presenta vibración armónica simple. Los sensores de vibraciones utilizados captan vibraciones provenientes de distintas fuentes.

Algunas de las causas que generan vibraciones pueden ser las siguientes:

Desbalanceamiento residual del motor, esto produce una vibración del tipo senoidal con amplitud V_1 y frecuencia f_1 , como se muestra en la figura 2.5.

Desalineamiento: se produce entre el motor y la máquina, generando una vibración senoidal de amplitud V_2 y frecuencia f_2 , esto se muestra en la figura 2.5.

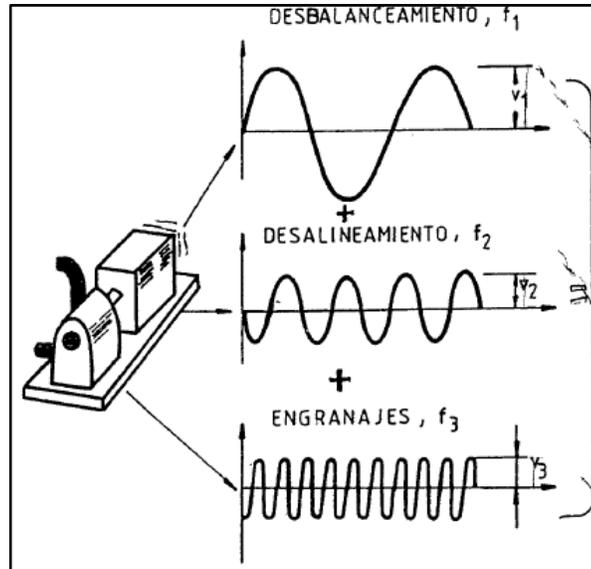


Figura 2.5: Tipos de vibración captadas por los sensores. Fuente: (Saavedra, 2009)

Vibración global: corresponde a la suma de todas las vibraciones que capta el sensor, provenientes de distintas fuentes de excitación, todas estas vibraciones se denominan componentes.

2.3.1 Análisis de la vibración en el dominio del tiempo y dominio frecuencias

La medición de vibraciones realizada a través de la señal vibratoria es difícil de analizar en el dominio tiempo, es decir, la forma de la onda en el tiempo, por lo tanto, se estudia en el dominio frecuencia.

2.3.2 Análisis frecuencial o espectral

Este análisis corresponde a la descomposición de la vibración global en los componentes que la conforman, la manera de presentar estos resultados es mediante un gráfico en el cual se indica la amplitud de cada componente vibratorio versus su frecuencia, llamado espectro vibratorio (Saavedra, 2009).

Las señales de vibraciones obtenidas en el dominio temporal entregan información sobre el estado de cada componente de un equipo analizado, la dificultad que trae consigo el dominio

Capítulo 2. Marco teórico

temporal es que la información entregada se presenta de una forma muy compleja la cual es difícil de analizar.

Su objetivo es relacionar las frecuencias de vibración con la velocidad de rotación de la máquina, de esta forma se puede determinar el tipo de falla, debido a que cada falla presenta componentes características dependiendo de la frecuencia de rotación de la máquina (Lavanderos, 2013), en la figura 2.6 se muestra un espectro con altas vibraciones que corresponde a los descansos de una bomba de agua antes de ser lubricados.

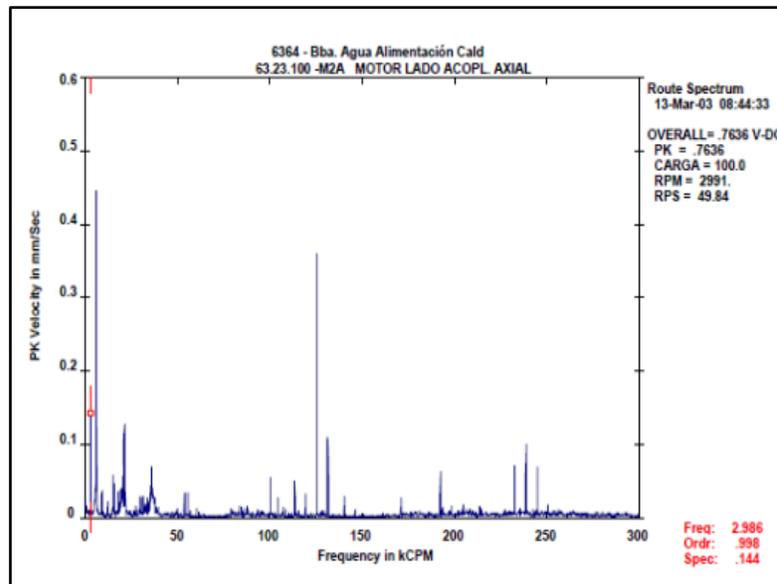


Figura 2.6: Espectro de los descansos de una bomba de agua sin lubricación. Fuente: (Lavanderos, 2013)

En la figura 2.7 se observa el espectro de vibraciones de los descansos de la bomba en este caso lubricados.

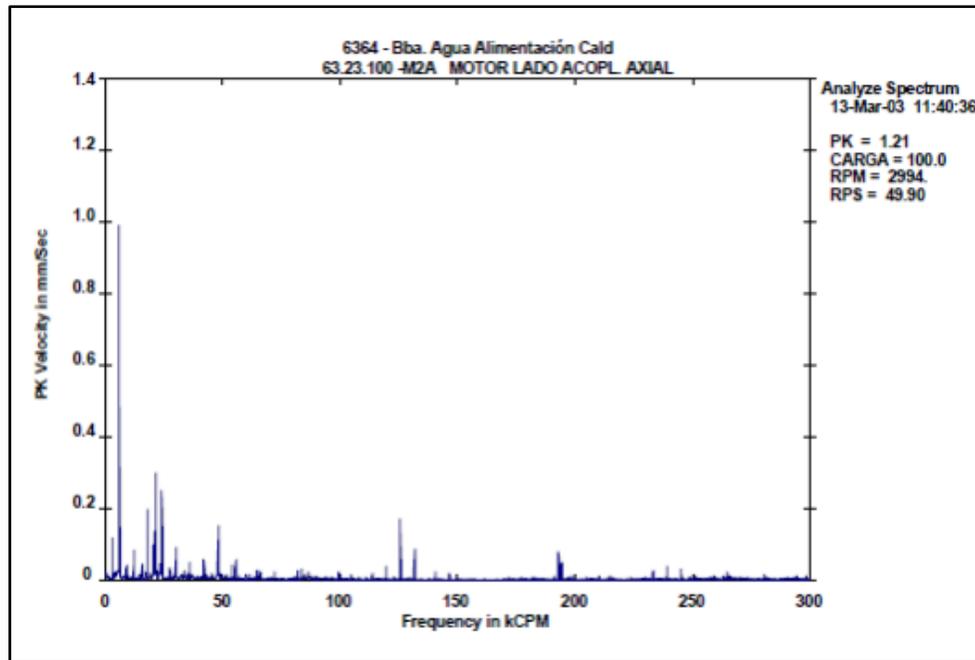


Figura 2.7: Espectro de vibraciones de los descansos de una bomba lubricados. Fuente: (Lavanderos, 2013)

2.3.3 Análisis de espectro vibratorio

Para realizar un correcto análisis del espectro vibratorio se deben considerar los puntos que se nombran continuación:

- Relacionar de manera precisa la frecuencia de las vibraciones con la velocidad de rotación de la máquina.
- Se debe determinar porque se genera cada peak, para esto se debe considerar que las vibraciones pueden provenir de distintas fuentes.
- Vibraciones propias del funcionamiento de la máquina (Lavanderos, 2013).
- Vibraciones generadas por condiciones de funcionamiento inapropiadas (Lavanderos, 2013).
- Vibraciones que provienen de otras máquinas.
- Vibraciones producidas por fallas de la máquina como son desbalanceo, solturas, roce, etc (Lavanderos, 2013).

2.3.4 Puntos que se deben identificar para realizar el diagnóstico

Para poder realizar un correcto análisis del espectro vibratorio se debe poner interés tanto en los peak como en las frecuencias en que estos se producen.

Dentro del espectro, las vibraciones se denotan como armónicos como se muestra en la Figura 2.8, los cuales corresponden a múltiplos de la frecuencia de giro del sistema las cuales pueden ser 1X, 2X, 3X. etc, también se encuentran los sub armónicos los cuales son 0,5X; 0,3X; 0,8, y finalmente los medios armónicos: 1,5X; 2,5X; etc.

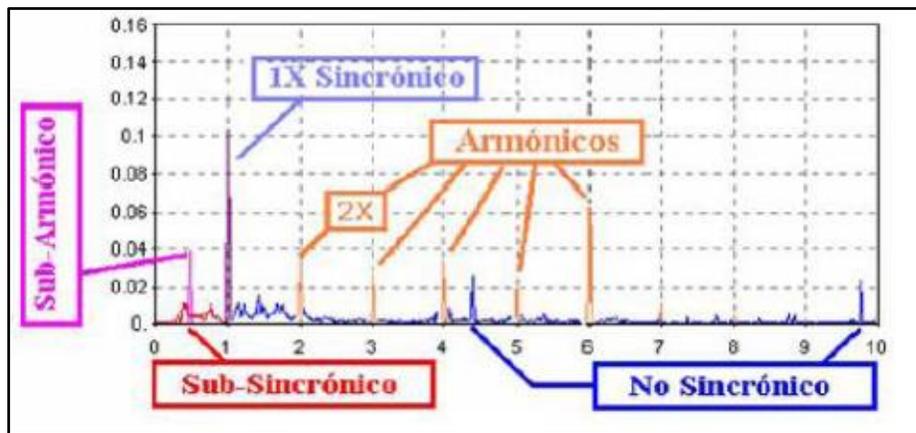


Figura 2.8: Componentes del espectro de vibraciones. Fuente: (Lavanderos, 2013)

2.4 TÉCNICAS DE MEDICIÓN

Existen distintas magnitudes utilizadas para medir la vibración global, dentro de estas se encuentra el valor pico, que es utilizado para medir desplazamiento, valor pico a pico y valor RMS, estos para medir aceleración y velocidad respectivamente, en la figura 2.9 se muestra las magnitudes de la vibración global.

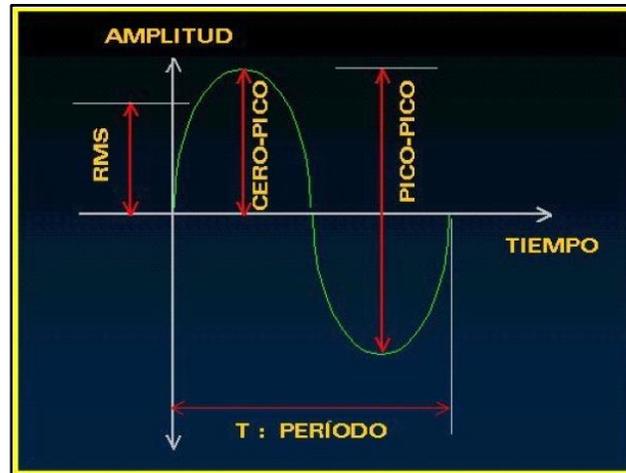


Figura 2.9: Formas de medir la amplitud vibratoria. Fuente: (Reyes & Galleguillos, 2014)

2.4.1 Etapas de medición

2.4.1.1 Etapa transductora

En esta etapa el sensor de vibraciones denominado transductor, transforma la vibración mecánica en una señal eléctrica que es proporcional a la magnitud medida (Saavedra, 2009).

El transductor es un dispositivo electrónico que censa una cantidad física (vibración, temperatura o presión) y la convierte en una señal eléctrica (voltaje) proporcional a la magnitud medida, la sensibilidad del transductor corresponde a la relación existente entre la señal eléctrica de salida y la magnitud física de entrada.

En esta etapa de la medición se debe determinar el tipo de sensor que se utilizará para realizar la medición, existen tres tipos de sensor, los cuales se nombran a continuación:

Sensor de desplazamiento sin contacto

Este tipo de sensor entrega la distancia que existe entre el eje y el sensor, su medida corresponde al valor pico a pico, donde su sensibilidad es de 200 mV/mil lo cual significa que si el sensor mide un desplazamiento pico a pico de 1 mils¹, entonces se obtendrá un voltaje de salida de 200 mV.

¹ Milésimo de pulgada

Capítulo 2. Marco teórico

El sensor está formado por una sonda, un cable de extensión, un oscilador demodulador y una fuente de poder (Lavanderos, 2013), como se muestra en la figura 2.10.

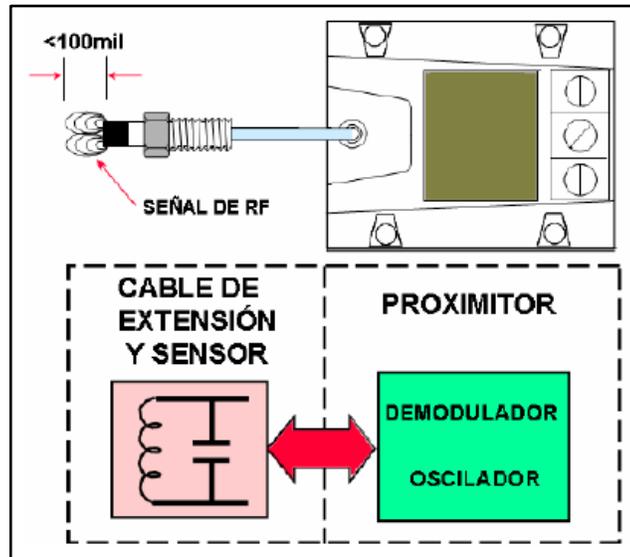


Figura 2.10: Esquema de funcionamiento de un sensor de desplazamiento. Fuente: (Daza, 2007)

Sensor de velocidad

Este tipo de sensor se ubica sobre la superficie exterior del descanso y miden el desplazamiento de la carcasa, su funcionamiento se basa en la existencia de un imán que se encuentra fijo a una masa M , cuando la bobina se mueve respecto del imán, se induce una fuerza electromotriz en las espiras de la bobina. Este tipo de sensor son utilizados para medir frecuencias mayores a 700 rpm.

Sensor de aceleración

El sensor de aceleración se basa en las propiedades de materiales como el cuarzo, su funcionamiento se basa en la distribución asimétrica de sus cargas, al momento de aplicarle una fuerza externa en la misma dirección de su polarización se forma una carga eléctrica en su superficie, lo que produce una diferencia de potencial entre ellas, esta carga es proporcional a la fuerza aplicada, en la figura 2.11 se muestra algunos tipos de sensores de aceleración.

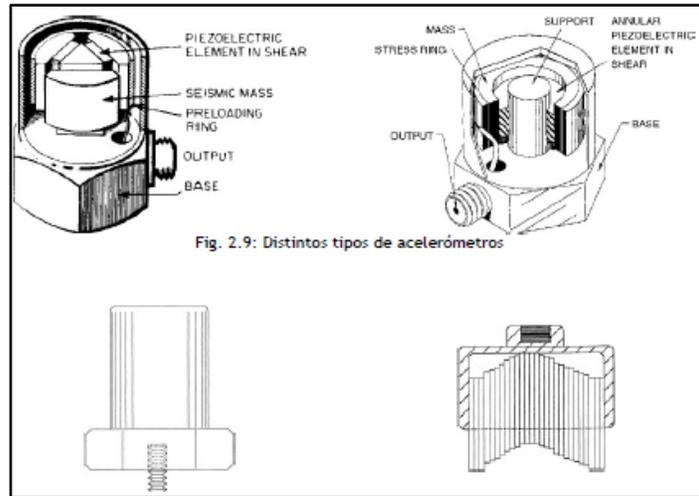


Figura 2.11: Tipos de sensores de aceleración. Fuente: (Daza, 2007).

2.4.1.2 Etapa de acondicionamiento

Algunas de las señales recibidas de los transductores no pueden ser introducidas directamente al sensor de vibraciones, por lo que se deben ser acondicionadas mediante el uso de filtros.

2.4.1.3 Filtros

Los filtros corresponden a circuitos electrónicos donde su función es dejar pasar la señal cuya frecuencia se encuentre dentro de la banda designada por el filtro, por lo tanto, los filtros se pueden clasificar según la parte del espectro que se quiera ver de la siguiente manera:

Filtro pasa alto: este tipo de filtro deja pasar la frecuencia que se encuentran sobre la frecuencia de corte del filtro.

Pasa bajo: este filtro deja pasar toda frecuencia que se encuentre bajo la frecuencia de corte del filtro.

Pasa banda: este filtro sólo deja pasar las frecuencias que se encuentren dentro de un rango de frecuencia, denominado ancho de banda de filtro.

2.4.2 Medición

2.4.2.1 Medidor de vibraciones

Un medidor de vibraciones tiene como finalidad proporcionar los valores pico, pico a pico o RMS que provienen de la señal vibratoria. El medidor posee filtros pasa altos y pasa bajos con el objeto de reducir las posibilidades de interferencia provenientes de ruidos de altas y bajas frecuencias. Tiene además la capacidad de integrar la señal que le llega al sensor, si el medidor es un velocímetro se obtiene la medición de la velocidad y el desplazamiento, si el medidor es un acelerómetro, se puede obtener el valor de aceleración, velocidad o desplazamiento (Saavedra, 2009).

2.4.2.2 Analizador de vibraciones

La función de un analizador es determinar el contenido frecuencial de una señal en el dominio del tiempo.

Tipos de analizadores:

Recolector analizador digital de datos: son medidores portátiles y con alta capacidad de memoria, los datos obtenidos son descargados a un software especializado de análisis que cuenta con datos históricos y diversos recursos de análisis.

Analizador en tiempo real: corresponde a un analizador digital o FFT, para calcular el espectro digitaliza la señal, el analizador de vibraciones calcula el espectro en frecuencias utilizando el algoritmo de cálculo llamado la transformada rápida de Fourier (FFT), que sea tiempo real significa que se va realizando y mostrando el espectro vibratorio simultáneamente como va llegando la señal.

2.4.2.3. Transformada rápida de Fourier

La transformada rápida de Fourier (FFT) captura la señal proveniente de la máquina, posteriormente calcula todas las señales senoidales que contiene la señal capturada de la

máquina y las muestra individualmente, en la figura 2.12 se muestra un gráfico desplazamiento v/s tiempo de cómo se realiza la transformación de la señal, tomada directamente desde un equipo en funcionamiento, hasta un espectro amplitud v/s frecuencia, en color verde se muestra la señal proveniente directamente de la máquina, la FFT calcula todas las señales senoidales en el dominio tiempo, las que se muestran en azul y por último se muestra cada una en el dominio de la frecuencia en color rojo (Daza, 2007).

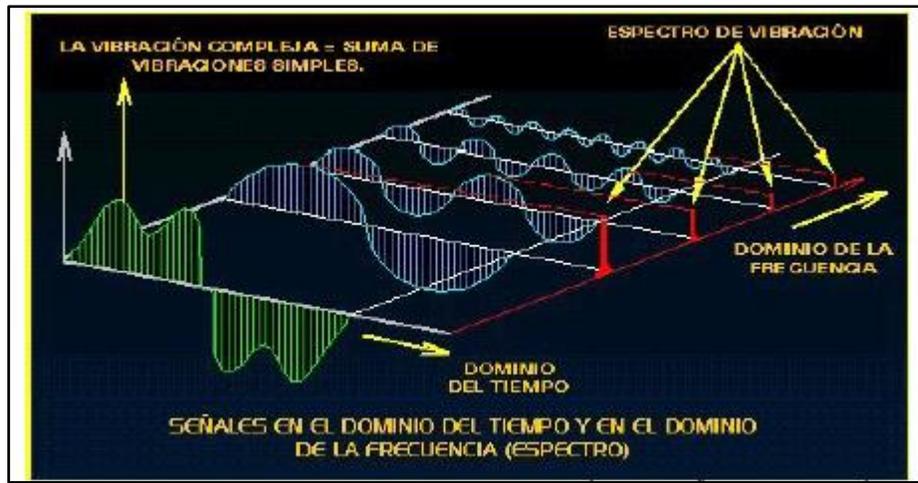


Figura 2.12: Esquema del procedimiento de transformación de la señal. Fuente: (Companioni, 2016)

Serie de Fourier

El procesamiento de la señal se realiza desde la forma de onda hasta el espectro para realizar el análisis de la señal medida, esta operación se basa en la serie de Fourier, la cual corresponde a una sumatoria infinita de las funciones senoidales las que se multiplican por un factor de ponderación, como se muestra en la ecuación (15).

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{-jn\omega t} \quad (15)$$

Donde:

C_n : coeficiente de la serie dado por

Capítulo 2. Marco teórico

$$C_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T_p}{2}}^{\frac{T_p}{2}} x(t) e^{-jn\omega t} dt$$

La transformada de Fourier permite pasar del dominio tiempo al dominio frecuencia de una señal vibratoria utilizando la ecuación (16).

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (16)$$

Este método es imposible de utilizar en equipos reales, debido a que la señal tomada está contaminada con ruidos y señales que provienen de otros equipos.

Transformada Discreta de Fourier

El no contar con una función que describa la vibración, los valores obtenidos de la señal medida son discretizados, lo que es realizado mediante la transformada Discreta de Fourier (TDF), mediante la ecuación (17) transforma los N puntos tomados de la señal en N/2 puntos discretos del espectro, denominadas líneas cuando se trabaja en el espectro en frecuencia

$$X(k) = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^{N-1} x(n) e^{\frac{-j2\pi kn}{N}} \quad (17)$$

$K = 1, 2, \dots, N-1$

Donde:

N: corresponde a la cantidad de puntos de la señal

2.4.3 Análisis

2.4.3.1 Técnica de la envolvente

La característica de esta técnica es la de detectar zonas resonantes excitadas o moduladas por fuerzas de impacto periódicas, donde su frecuencia de repetición indica el lugar donde se

Capítulo 2. Marco teórico

encuentra la falla y su amplitud corresponde a la medida del defecto y progresión de la falla (Quiroga, Trujillo, & Quintero, 2012).

Esta técnica es utilizada para detectar problemas en los elementos rodantes en etapas tempranas de aparición del daño.

2.4.3.2 Factor cresta

El factor cresta representa una cuantificación de la severidad del defecto que presenta el rodamiento dependiendo de su energía vibratoria producida por el defecto.

Este indicador es el más adecuado para detectar defectos locales, y se define como la razón entre el valor pico y el valor RMS de la vibración global la cual se muestra en la ecuación (18), aunque no discrimina respecto a fallas en otros elementos de la máquina.

$$\text{Factor cresta} = \frac{\text{Valor peak}}{\text{Valor RMS}} \quad (18)$$

2.5 CONDICIÓN MECÁNICA DE UN RODAMIENTO

2.5.1 Vida útil de un rodamiento

La forma de estimar la vida útil de un rodamiento es mediante la fórmula ISO de la vida nominal, la cual se da en la ecuación 19.

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 n} \left(\frac{C}{P} \right)^p \quad (19)$$

Donde:

L_{10h} = vida nominal del rodamiento en horas de servicio

n = velocidad de giro, en (rev/min)

C = capacidad de carga dinámica, en (N)

P = carga dinámica equivalente en (N)

Capítulo 2. Marco teórico

p = exponente, puede tomar los siguientes valores, rodamiento de bolas ($p = 3$), rodamiento de rodillos ($p = 10/3$).

2.5.2 Daños generados por vibraciones en rodamientos

Vibraciones de alta frecuencia

Corresponden a vibraciones sobre 5000 Hz, son medidas por diferentes técnicas, como:

- Spike de energía
- HFD (High Frequency Detection) aceleración.
- Impulsor de choque
- Ultrasonido
- SEE

Vibraciones a las frecuencias naturales de los componentes del rodamiento

El rango de las frecuencias naturales de los componentes de los rodamientos es aproximadamente entre 500 y 2000 Hz, si se considera el rodamiento dañado, estas frecuencias tendrán una excitación importante.

Frecuencias características de los defectos

Existen fallas características de los rodamientos a frecuencias características de los mismos que se originan cuando los elementos rodantes presentan fallas, estas son:

BPF0: ((Ball Pass Frequency of the Outer race), es decir, frecuencia de paso de los elementos rodantes en la pista externa, para obtener esta frecuencia se utiliza la ecuación 20.

$$\text{BPF0: } \frac{\text{RPM} * n}{2} \left(1 - \frac{d \cos \beta}{d_m} \right) \quad (20)$$

Donde:

Capítulo 2. Marco teórico

n = número de elementos rodantes

d_m = diámetro entre los centros de los elementos rodantes

d = diámetro de los elementos rodantes

β = ángulo de contacto

BPMI: Ball Pass Frecuenc of the Inner race, frecuencia de paso de los elementos rodantes en la pista interna, este valor se obtiene con la ecuación (21).

$$\text{BPMI} = \frac{\text{RPM} * n}{2} \left(1 + \frac{d \cos \beta}{d_m} \right) \quad (21)$$

Donde:

n = número de elementos rodantes

d_m = diámetro entre los centros de los elementos rodantes

d = diámetro de los elementos rodantes

β = ángulo de contacto

BSF: BSF o la frecuencia de deterioro de los elementos rodantes, es desde el punto de vista físico el número de giros que realiza un elemento rodante cada vez que el eje realiza un giro completo (Flores, Andres, Erwin, & Jorge, 2020), en la ecuación (22) se detalla.

$$\text{BSF} = \frac{\text{RPM} * d_m}{2d} \left[1 - \left(\frac{d}{d_m} \right)^2 \cos^2 \beta \right] \quad (22)$$

FTF: frecuencia fundamental de tren o de deterioro de la jaula de un rodamiento, se define físicamente como el número de giros que realiza la jaula del rodamiento cada vez que el eje realiza un giro completo (Flores, Andres, Erwin, & Jorge, 2020)

Fundamental Train Frecuency, corresponde a la frecuencia de rotación del portaelementos, jaula o canastillo que contiene a los elementos rodantes. Se observa en la ecuación (23).

$$\text{FTF} = \frac{\text{RPM}}{2} \left(1 - \frac{d \cos \beta}{d_m} \right) \quad (23)$$

Suma y restas de defectos

Cuando un defecto crece en un rodamiento, este defecto puede aportar en el desarrollo de otros defectos, lo que producirá varias frecuencias características generando defectos múltiples.

Etapas de desarrollo de una falla

Durante la aparición de una falla en un rodamiento, este presenta distintos síntomas durante su desarrollo, las cuales se pueden clasificar en tres etapas:

Etapa A: La forma inicial del defecto se presenta como una grieta microscópica, produciendo vibraciones de muy baja amplitud las que son confundidas con el ruido eléctrico producido durante la medición. Durante esta etapa el rodamiento no emitirá ruidos ni alza de temperatura. Desde la detección incipiente de la falla hasta que se produce una falla funcional del componente transcurre aproximadamente un periodo de 6 meses (Saavedra, 2009).

Etapa B: A medida que la falla va creciendo las frecuencias de los componentes del rodamiento se comienzan a observar en el espectro vibratorio, en primera instancia son componentes discretas, luego aparecen bandas laterales, como se muestra en la figura 2.13, el rodamiento alcanza la falla a los 3 meses (Saavedra, 2009).

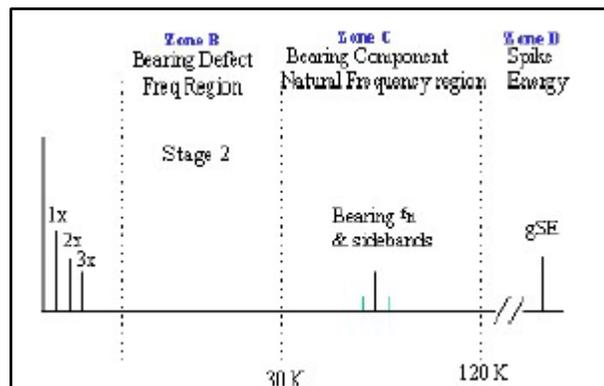


Figura 2.13: Espectro de vibraciones para las distintas etapas. Fuente: (Daza, 2007)

Etapa C y D: En la etapa C aparecen los componentes de fallas típicas del rodamiento como BPFO y armónicos, en la etapa D, se presenta una vibración de alta frecuencia, lo que indica la aparición de una falla catastrófica del elemento rodante, se debe realizar el recambio de este.

2.6 EQUIPO DE PRUEBAS MACHINE FAULT SIMULATOR

El simulador de fallas de maquinaria es una herramienta para estudiar las formas de fallas en maquinaria sin comprometer la producción. La figura 2.14 muestra una imagen del simulador donde se enumeran sus partes más importantes.

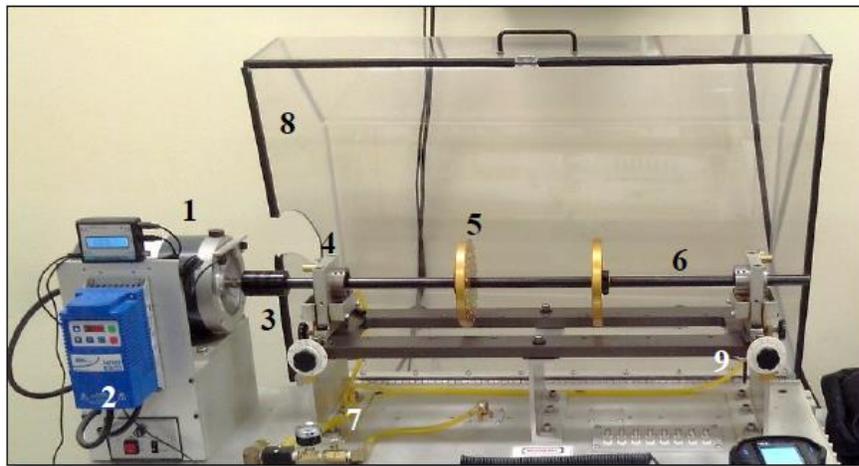


Figura 2.14: Simulador Machine fault simulator. Fuente: (Perez J., 2017)

Las partes más importantes del equipo son:

1. Motor de accionamiento.
2. Variador de frecuencia.
3. Acoplamiento flexible.
4. Descansos Hidrodinámicos.
5. Discos de inercia.
6. Eje del banco de pruebas.
7. Válvula de paso de aceite y manómetro.
8. Cubierta protectora
9. Pernos de regulación de bancada

2.6.1 Componente a estudiar

El componente al cual se realizará el análisis de vibraciones, corresponde al rodamiento ER 12 K de la marca link-Belt que se encuentra en los descansos hidrodinámicos.

La función de un rodamiento es soportar y guiar con mínima fricción los elementos giratorios de una máquina como son ejes o ruedas, gracias a su funcionamiento producen gran precisión y baja fricción, por lo cual pueden girar a grandes velocidades generando bajo ruido y bajo calor (SKF, 2019).

2.6.1.1. Clasificación de los rodamientos

Los rodamientos se pueden clasificar según su elemento rodante, siendo los más comunes los rodamientos de bolas y rodamientos de rodillos.

Los rodamientos de bolas permiten trabajar a altas velocidades ya que los elementos rodantes establecen un contacto puntual con el aro interno como se muestra en la figura 2.15, lo que genera menos superficie en contacto. Los rodamientos de rodillos generan un contacto lineal con la rodadura interna del aro como se muestra en la figura 2.15, pudiendo soportar mayor carga.

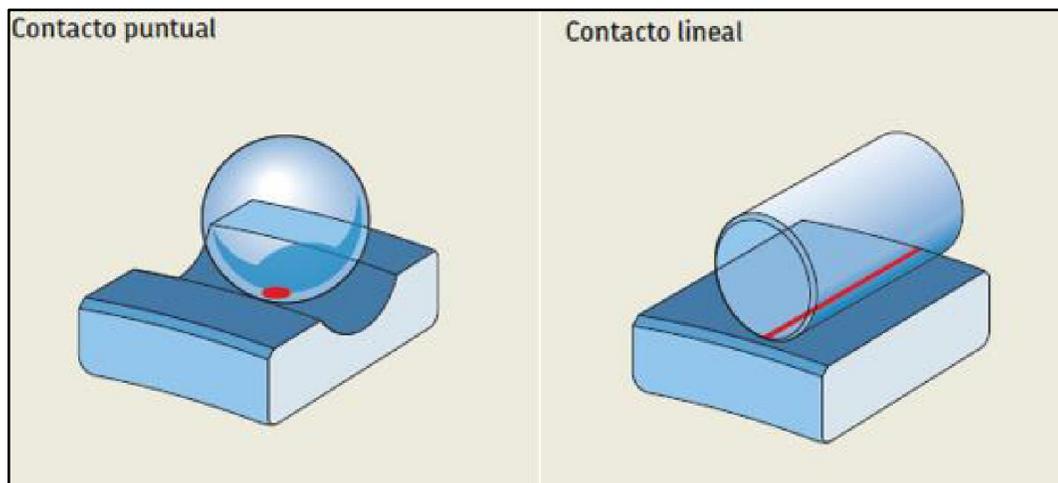


Figura 2.15: Contacto de los rodamientos con el aro interno. Fuente: (SKF, 2019)

Capítulo 2. Marco teórico

Según el sentido de carga:

Rodamientos radiales: Estos tipos de rodamientos soportan cargas aplicadas principalmente en dirección perpendicular al eje.

Rodamientos axiales: Estos rodamientos soportan cargas aplicadas de manera axial a lo largo del eje, este tipo de rodamientos no pueden trabajar a velocidades más altas que los rodamientos radiales.

En la figura 2.16 se muestra un ejemplo de rodamientos radiales.

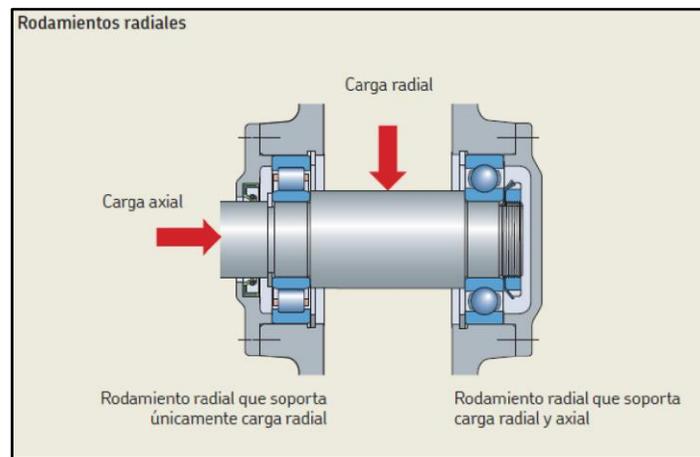


Figura 2.16: Cargas en un rodamiento. Fuente: (SKF, 2017).

Componentes principales de un rodamiento:

Aro interior y exterior: la función principal de los aros es alojar los elementos rodantes para que se desplacen dentro de la pista de rodadura.

Elementos rodantes: Los elementos rodantes los cuales pueden ser bolas o rodillos transfieren la carga entre los aros interior y exterior.

Jaula: Permite que los elementos rodantes queden separados a la misma distancia uno de otro.

Capítulo 2. Marco teórico

Sello: Son los encargados de evitar que entren elementos contaminantes al interior del rodamiento.

En la figura 2.17 se muestra los componentes principales de un rodamiento

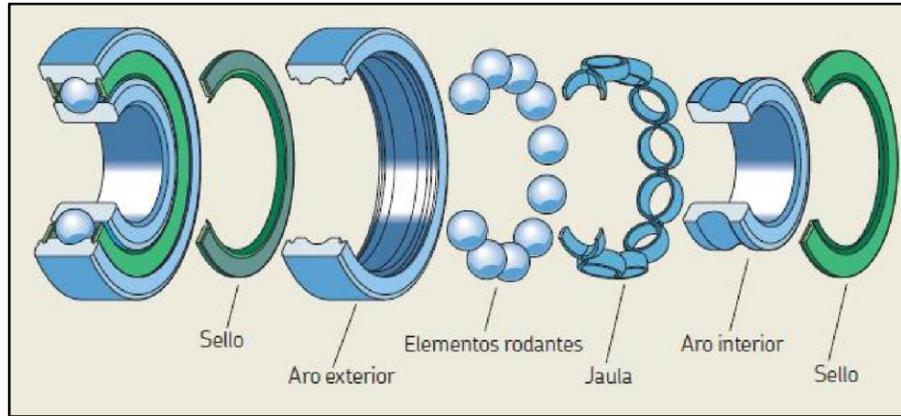


Figura 2.17: Componentes de un rodamiento. Fuente (SKF, 2019)

Terminología perteneciente a rodamientos:

d: Diámetro del agujero

D: Diámetro exterior

B: Ancho del rodamiento

H: Altura rodamiento

r: Dimensión del chaflán

α : Ángulo de contacto

En la figura 2.18 se muestran los esquemas para los rodamientos radiales y axiales

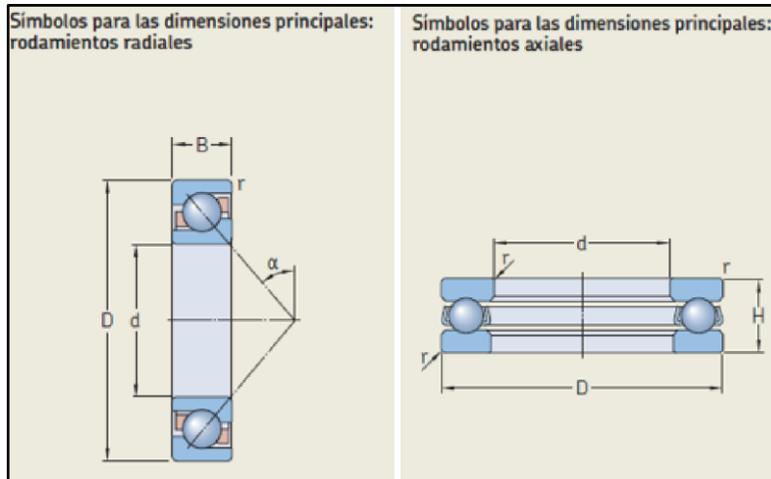


Figura 2.18: Terminología en rodamientos radiales y axiales. Fuente (SKF, 2019)

Rodamiento ER12K

El rodamiento a estudiar corresponde a un rodamiento Link-Belt rodamiento anillo interior tipo a con bloqueo tornillo prisionero como se muestra en la figura 2.19, sus dimensiones principales se muestran en el anexo 1 (ver **anexo 1**).

En la figura 2.19 se detalla un plano del rodamiento, donde se especifican sus dimensiones.

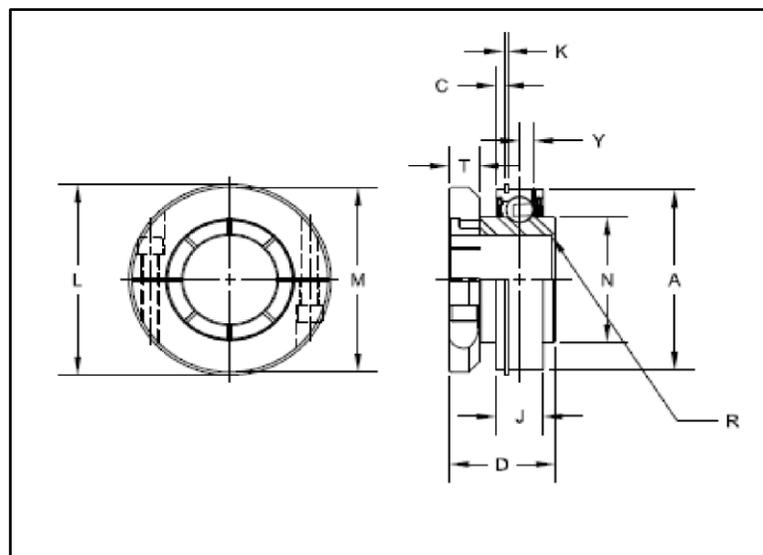


Figura 2.19: Dimensiones del rodamiento ER12K. Fuente: (REXNORD)

Las dimensiones principales para cálculos posteriores de las frecuencias de fallas se muestran en la tabla 2.1

Tabla 2.1: Dimensiones principales del rodamiento. Fuente: (Rexnord, 2022)

Especificaciones	ER12K
Diámetro externo (mm)	47
Diámetro interno (mm)	19,05
Diámetro primitivo (mm)	33,5
Diámetro bolas (mm)	7,145
Número de bolas	8
Ángulo de contacto	0°

En la tabla 2.2 se detallan las especificaciones técnicas para el rodamiento ER12K

Tabla 2.2: Especificaciones técnicas del rodamiento. Fuente: (Rexnord, 2022)

Tipo de sello	Sello de labios N
Marca rodamiento	LINK-BELT 200 SERIES BALL
Material de revestimiento	Oxido negro
Tipo de rodamiento	Rodamiento de bolas, servicio estándar
Carga dinámica	3190 lb
Carga estática	1480 lb
Tipo de lubricación	EXXON RONEX MP STD
Máxima temperatura	107° C

2.7 SEVERIDAD VIBRATORIA

Conceptos básicos:

Norma: corresponde a un documento técnico, el cual es aprobado por un organismo reconocido y accesible al público, para su elaboración se requiere del consenso de todas las partes interesadas, su objetivo es el interés general y se aplica a actividades repetidas o continuas.

Alarma: se define como una advertencia, en la cual las vibraciones acusan una magnitud o un cambio significativo, que puede recurrir en realizar alguna acción correctiva. Desde la aparición de la alarma, el equipo puede seguir funcionando por un tiempo determinado el cual dependerá principalmente de la criticidad del equipo dentro de la planta.

Falla: el límite de peligro de una norma de evaluación de severidad se relaciona directamente con la integridad mecánica del equipo, la cual dependerá directamente de las características de los diseños.

2.8 NORMAS DE EVALUACIÓN

Las normas son las encargadas de evaluar la severidad de la vibración respondiendo la pregunta de cuánta es demasiada vibración para una máquina o estructura, para definir la severidad vibratoria se debe basar en el daño que puede generar.

Existen diversas asociaciones que establecen los estándares para evaluar la severidad vibratoria, dentro de estas se encuentran grupos industriales como API, AGMA, y organizaciones como ANSI, ISO, VDI, entre otras.

2.8.1 Norma ISO 10816-3

Esta norma establece condiciones y procedimientos generales para la evaluación de la vibración, utilizando mediciones realizadas sobre partes no rotativas de la máquina, el criterio para su evaluación se basa en monitorización operacional como también pruebas de validación establecidas para garantizar el funcionamiento fiable de la máquina.

Esta norma está formada por 5 partes (ISO, 1995) las que se nombran a continuación:

-Parte 1: Indicaciones generales (ISO, 1995).

-Parte 2: Turbinas de vapor y generadores que superen los 50 MW con velocidades típicas de trabajo de 1500, 1800, 3000 y 3600 RPM (ISO, 1995)

Capítulo 2. Marco teórico

-Parte 3: Maquinaria industrial con potencia nominal por encima de 15 kW y velocidades entre 120 y 15000 RPM (ISO, 1995).

-Parte 4: Conjuntos movidos por turbinas de gas excluyendo las empleadas en aeronáutica (ISO, 1995).

-Parte 5: Conjuntos de máquinas en plantas de hidrogenación y bombeo (únicamente disponible en inglés) (ISO, 1995).

Se debe prestar especial atención para asegurar que los sensores estén montados correctamente y que tales montajes no degraden la precisión de la medición. Los puntos de medida típicamente son tres, dos puntos ortogonales en la dirección radial en cada caja de descanso y un punto en la medición axial (ISO, 1995).

Las mediciones deben realizarse cuando el rotor y los descansos principales han alcanzado sus temperaturas estacionarias de trabajo y con la máquina funcionando bajo condiciones nominales o específicas (por ejemplo, de velocidad, voltaje, flujo, presión y carga) (ISO, 1995).

En máquinas con velocidad o carga variable, las velocidades deben realizarse bajo todas las condiciones a las que se espera que la máquina trabaje durante períodos prolongados de tiempo. Los valores máximos medidos, bajo estas condiciones, serán considerados representativos de la vibración. Si la vibración es superior a lo que el criterio permite y se sospecha de excesiva vibración de fondo, las mediciones se deben realizar con la máquina detenida para determinar el grado de influencia de la vibración externa. Si con la máquina detenida excede el 25% de la vibración medida con la máquina operando, son necesarias acciones correctivas para reducir el efecto de la vibración de fondo. En algunos casos el efecto de la vibración de fondo se puede anular por análisis espectral o eliminando las fuentes externas que provocan las vibraciones de fondo (ISO, 1995).

La clasificación de la severidad de la vibración se clasifica dependiendo de los siguientes parámetros (ISO, 1995):

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

2.8.1.1 Clasificación de las máquinas potencia o altura de eje

-Grupo 1: Máquinas rotatorias grandes con potencia superior 300 kW. Máquinas eléctricas con altura de eje $H \geq 315$ mm (ISO, 1995).

-Grupo 2: Máquinas rotatorias medianas con potencia entre 15 y 300 kW. Máquinas eléctricas con altura de eje $160 \leq H \leq 315$ mm (ISO, 1995).

-Grupo 3: Bombas con impulsor de múltiples álabes y con motor separado (flujo centrífugo, axial o mixto) con potencia superior a 15 kW (ISO, 1995).

-Grupo 4: Bombas con impulsor de múltiples álabes y con motor integrado (flujo centrífugo, axial o mixto) con potencia superior a 15 kW (ISO, 1995).

2.8.1.2 Clasificación según la flexibilidad del soporte

Si la primera frecuencia natural del sistema máquina-soporte en la dirección de la medición es mayor que su frecuencia principal de excitación (en la mayoría de los casos es la frecuencia de rotación) en al menos un 25%, entonces el sistema soporte puede ser considerado rígido en esa dirección. Todos los otros sistemas soportes pueden ser considerados flexibles. En algunos casos el sistema máquina-soporte puede ser considerado rígido en una dirección de medición y flexible en la otra dirección. Por ejemplo, la primera frecuencia natural en la dirección vertical puede estar sobre la frecuencia principal de excitación mientras que la frecuencia natural horizontal puede ser considerablemente menor. Tales sistemas serían rígidos en el plano vertical y flexibles en el plano horizontal.

La evaluación de la severidad de la vibración se realiza mediante la figura 2.20, considerando clasificación de la máquina y su velocidad de funcionamiento, se puede conocer en qué zona de la figura se encuentra la máquina y que tipo de acción se debe realizar.

Zona A: Valores de vibración de máquinas recién puestas en funcionamiento o reacondicionadas (ISO, 1995).

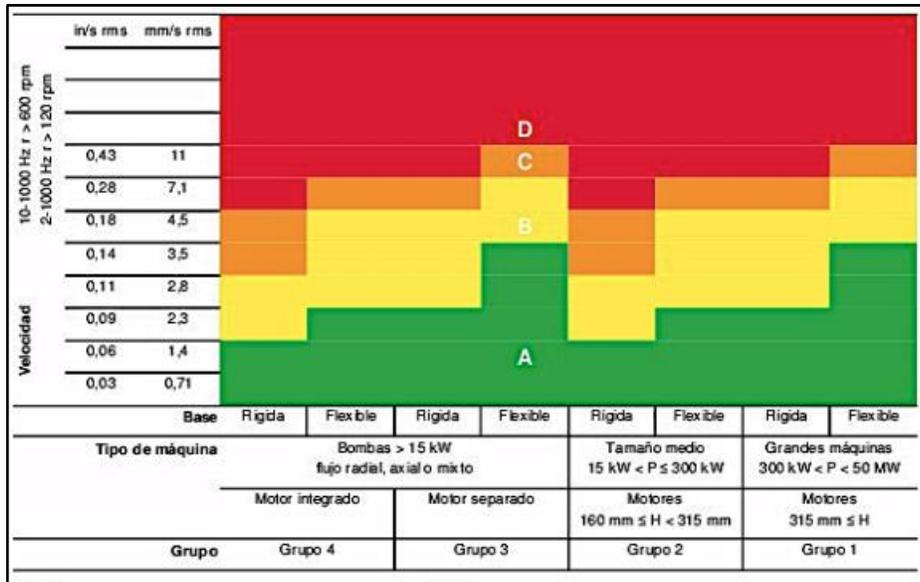


Figura 2.20: Tabla de severidad 10816 según el tipo de máquina. Fuente: (ISO, 1995)

2.8.2 Norma ISO 2372

Esta norma se encarga de evaluar la vibración de un equipo mediante la velocidad vibratoria. Para realizar el análisis espectral de vibración se utilizará esta norma ya que considera máquinas de menor potencia en relación a la norma ISO 10816-3.

Clasificación de las máquinas

En la tabla 2.3 se muestra la clasificación de máquinas según la norma ISO 2372

Tabla 2.3: Clasificación de las máquinas. Fuente: (Saavedra, Tutorial severidad vibratoria Parte 1)

Clase 1	Máquinas pequeñas con potencia menor a 15 kW
Clase 2	Máquinas de tamaño media con potencia entre 15kW y 300 kW
Clase 3	Máquinas grandes con potencia mayor a 300 kW, montadas en soporte rígido.
Clase 4	Máquinas grandes con potencia mayor a 300 kW, montadas en soporte flexible

Capítulo 2. Marco teórico

La tabla 2.4 indica la severidad del equipo según la velocidad mm/s RMS y el tipo de máquina

Tabla 2.4: Tabla de severidad norma ISO 2372. Fuente: (Saavedra, Curso Análisis de vibraciones de máquinas rotatorias nivel I, 2009)

Rango de velocidad efectiva ó RMS (mm/s)	Tipos de Máquinas			
	Clase I	Clase II	Clase III	Clase IV
0,18 - 0,28	A	A	A	A
0,28 - 0,45				
0,45 - 0,71				
0,71 - 1,12				
1,12 - 1,8	B	B	B	
1,8 - 2,8				
2,8 - 4,5	C	C	B	
4,5 - 7,1	D	D	C	
7,1 - 11,2			C	
11,2 - 18	D	D	D	
18 - 28			D	

La severidad de la vibración es clasificada por las 4 primeras letras del abecedario aumentando la severidad en orden alfabético como indica a continuación:

- A: Buena
- B: Satisfactoria
- C: Insatisfactoria
- D: Inaceptable

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN A LA PROBLEMÁTICA

3.1 CONFIGURACIONES GENERALES

En este capítulo se presentan la configuración de puntos de medición, definición de variables y el registro de las mediciones realizadas.

3.1.1 Definición de variables a utilizar

El equipamiento al cual se le realizarán las mediciones corresponde al equipo de simulación machine fault, el equipo de adquisición de datos a utilizar será el microlog analyser de SKF, el cual se conectará con el software Aptitude off line, de esta manera a continuación se definen las variables utilizadas en cada uno:

En la tabla 3.1 se muestran las condiciones de funcionamiento utilizadas en el equipo machine fault simulator.

Tabla 3.1: Condiciones de funcionamiento del equipo machine fault simulator. Fuente:

Elaboración propia

Motor	MARATHON ELECTRIC
Velocidad de funcionamiento	2000 rpm
Frecuencia	50 HZ
Potencia	0,56 kW
Rodamientos del eje	ER12-K

3.2 EQUIPAMIENTO A UTILIZAR

3.2.1 Microlog analyser:

El dispositivo de adquisición de datos (DAD), consiste en un terminal portátil el cual se muestra en la figura 3.1, este instrumento es el encargado de recopilar y almacenar los datos obtenidos de las mediciones, las mediciones de vibraciones se obtienen mediante sensores los cuales van conectado directamente al canal del equipo (SKF, 2016).



Figura 3.1: Dispositivo de adquisición de datos, microlog analyser. Fuente: Elaboración propia

3.2.2 Acelerómetro

El sensor de vibraciones corresponde a un acelerómetro piezoeléctrico de marca SKF modelo cmss 2220 el cual se observa en la figura 3.2, el acelerómetro está equipado con un cable PU de poliuretano integrado, resistente a fluidos de corte agresivos, con un extremo de cable flexible para una fácil conexión a los sistemas SKF Multilog On-line IMx. (SKF, 2022), en el anexo 2 (ver **anexo 2**) se detalla mayor información del acelerómetro mediante su ficha técnica.



Figura 3.2: Acelerómetro piezoeléctrico. Fuente: Elaboración propia

3.2.3 Software de análisis Aptitude Analyst de SKF

Es el software utilizado por el personal de mantenimiento para gestionar y analizar los datos obtenidos, presenta los datos a través de gráficos de tendencia y de espectros obtenidos de las distintas mediciones. Con estos gráficos es posible realizar análisis y detección de fallas en los rodamientos de un equipo. En la figura 3.3 se muestra la ventana principal del software donde se muestran los puntos de medición.

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

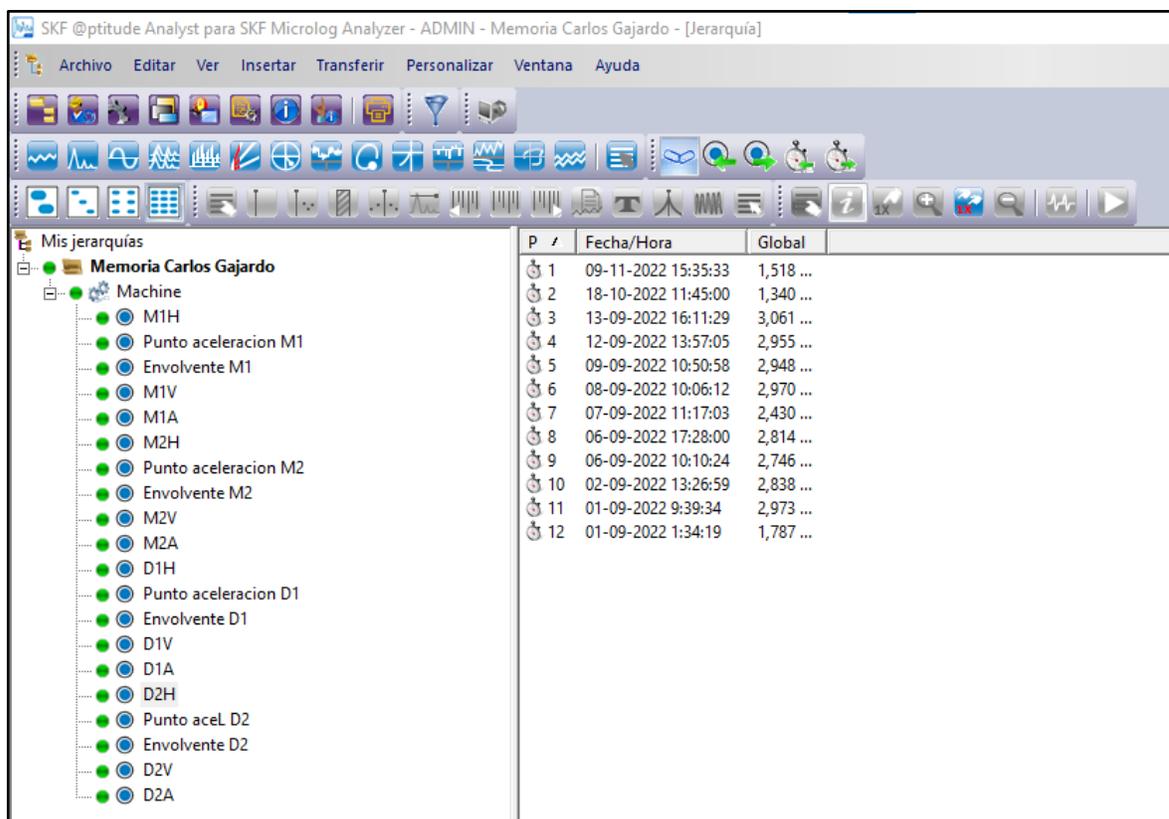


Figura 3.3: Ventana principal del software Aptitude analyst. Fuente: Elaboración propia

3.3 COMPONENTE A EVALUAR

El componente a evaluar corresponde al rodamiento ER12 K el cual se encuentra en los descansos del eje. En la figura 3.4 se observan sus respectivos elementos rodantes.



Figura 3.4: Rodamiento abierto sin sello de contaminación. Fuente: elaboración propia

Nomenclatura Rodamiento

La designación de este tipo de rodamiento se desglosa en la tabla 3.2

Tabla 3.2: Nomenclatura rodamiento ER12 K. Fuente (*REXNORD*)

ER	Serie de adaptadores, D.E cilíndrico con ranura de lubricación y OD anillo de localización
12	Diámetro del eje en dieciseisavos de pulgada
K	Bloqueo centrik-lok solo serie ER

3.4 CONFIGURACIÓN APTITUDE ANALYST

3.4.1 Creación de jerarquías

La manera de organizar los puntos de medición en el equipo de simulación se inicia con la creación de una jerarquía donde serán almacenadas las mediciones de vibraciones.

Para crear una jerarquía se deben realizar las siguientes indicaciones:

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

En el menú Archivo, se selecciona el comando Nuevo, luego se abre el cuadro de diálogo Nuevo y se debe introducir el nombre que se desee para esta jerarquía, para finalizar se realiza clic en aceptar (SKF, 2019).

Dentro de la jerarquía se encuentra la ruta que es donde se encontrarán los puntos de medición.

3.4.2 Creación de puntos

En el menú insertar se introducen los nuevos puntos de medición los que deben estar previamente identificados en el equipo.

Las mediciones serán realizadas en partes no rotativas del equipo las que se encuentran en la carcasa sobre las zonas donde se encuentren los rodamientos tanto del motor como los descansos del eje, las posiciones de los puntos de izquierda a derecha en el motor son: lado libre motor, lado acoplamiento motor, las posiciones de los puntos en los descansos de los ejes son: descanso lado motor y descanso lado libre, en cada punto se realizaran 3 tipos de mediciones, las que se nombran a continuación:

-Medición de velocidad: las mediciones de velocidad serán realizadas en las direcciones radial (horizontal, vertical) y axial en cada punto las cuales serán abreviadas con las letras H, V, A respectivamente.

-Medición de aceleración: en la dirección vertical de cada punto se tomará la medición de aceleración en g-RMS.

-Medición de envolvente de aceleración: en la dirección vertical de cada punto se tomará la medición de aceleración gE- Pico a Pico.

En la tabla 3.3 se muestra la descripción de cada punto de medición junto con su abreviatura.

Tabla 3.3: Puntos de medición. Fuente: Elaboración propia

M1H	Lado libre motor horizontal
Pto acel M1	Punto aceleración lado libre motor
E1	Filtro envolvente lado libre motor

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

M1V	Lado libre motor vertical
M1A	Lado libre motor axial
M2H	Lado acoplamiento motor horizontal
Pto acel M2	Punto aceleración lado acoplamiento motor
E2	Filtro envolvente lado acoplamiento motor
M2V	Lado acoplamiento motor vertical
M2A	Lado acoplamiento motor axial
D1H	Descanso lado acoplamiento horizontal
Pto acel D1	Punto aceleración descanso lado acoplamiento
ED1	Filtro envolvente descanso lado acoplamiento
D1V	Descanso lado acoplamiento vertical
D1A	Descanso lado acoplamiento axial
D2H	Descanso lado libre horizontal
Punto acel D2	Punto aceleración descanso lado libre
ED2	Filtro envolvente descanso lado libre
D2V	Descanso lado libre vertical
D2A	Descanso lado libre axial

En la figura 3.5 se muestra la ubicación y dirección en la cual se realizarán las mediciones.

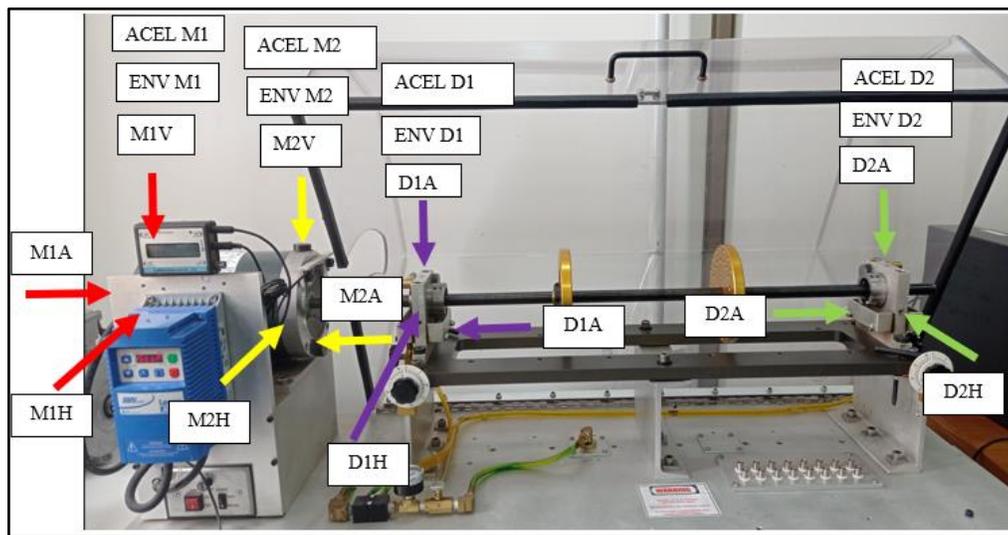


Figura 3.5: Ubicación de puntos de medición en el equipo. Fuente: Elaboración propia

La medición de cada punto siempre se obtendrá en el mismo lugar, el cual ha sido previamente marcado.

3.5 CONFIGURACIÓN DE PUNTOS DE MEDICIÓN

La forma de poder iniciar la medición con el equipo de adquisición de datos es cargando previamente la configuración de los puntos de medición definidos en el software Aptitude off line donde se utilizan las recomendaciones realizadas por SKF para sistemas encargados de medir vibraciones.

3.5.1 Configuración de puntos de velocidad

La primera medición corresponde a la velocidad, la que permite medir la energía destructiva que produce la vibración, sus unidades de medidas en el eje de las ordenadas son mm/s - RMS y en el eje de las abscisas CPM, esta medición será realizada en las direcciones horizontal, vertical y axial de cada punto, para realizar la configuración de los puntos de medición se deben seguir los siguientes pasos:

Paso 1: En la pestaña general se crea el punto de medición y su descripción, se utiliza el acelerómetro y la unidad de medida es mm/s- RMS respectivamente como se muestra en la figura 3.6.

The screenshot shows a software interface with a menu bar at the top containing: Alarma de velocidad, Mensajes, Notas, Frecuencias, Alamas HAL, Contribución, Imágenes, Línea de ref., Banda, Envolvente, General, Config., Cumplimiento, Claves filtro, Registro de la instalación, and Global. The main window is titled 'Identidad' and contains the following fields and options:

- Nombre: M1H
- Descripción: Lado libre motor horizontal
- Activar obtención de datos
- Tipo de DAD: Microlog Analyzer
- Aplicación: Vibración
- Tipo de sensor: Acelerómetro
- Unidades: mm/s
- Ubicación: [Empty text box]
- Orientación: Ning. (dropdown menu)
- Solo incluir PUNTO en informes si se ha obtenido la última medición
- Borrar alarma para No obtención últimas mediciones.

Figura 3.6: Configuración de puntos de velocidad. Fuente: Elaboración propia

Paso 2: En la pestaña configuraciones de deben seleccionar los puntos que se muestran en la tabla 3.4

Tabla 3.4: Configuración de puntos de velocidad. Fuente: Elaboración propia

Detección	RMS
Frec inicial	0 cpm
Frec final	60 Kcpm
Líneas	3200
Velocidad	2000 rpm
Medias	2

De esta manera la pestaña de configuración queda como se muestra en la figura 3.7

Figura 3.7: Pestaña de configuración de puntos de velocidad. Fuente: Elaboración propia

Paso 3: La configuración de las alarmas se debe realizar siguiendo las recomendaciones de la guía de configuración de puntos de aptitude_off_line de SKF para puntos de velocidad, en la tabla 3.5 se muestra la configuración de las alarmas.

Tabla 3.5: Configuración de alarmas para puntos de velocidad. Fuente: (Barahona, 2017)

Alerta alta	4 mm/s-RMS
Peligro alto	7 mm/s-RMS

Por lo tanto, en la pestaña global la configuración para las alarmas queda como se muestra en la figura 3.8.

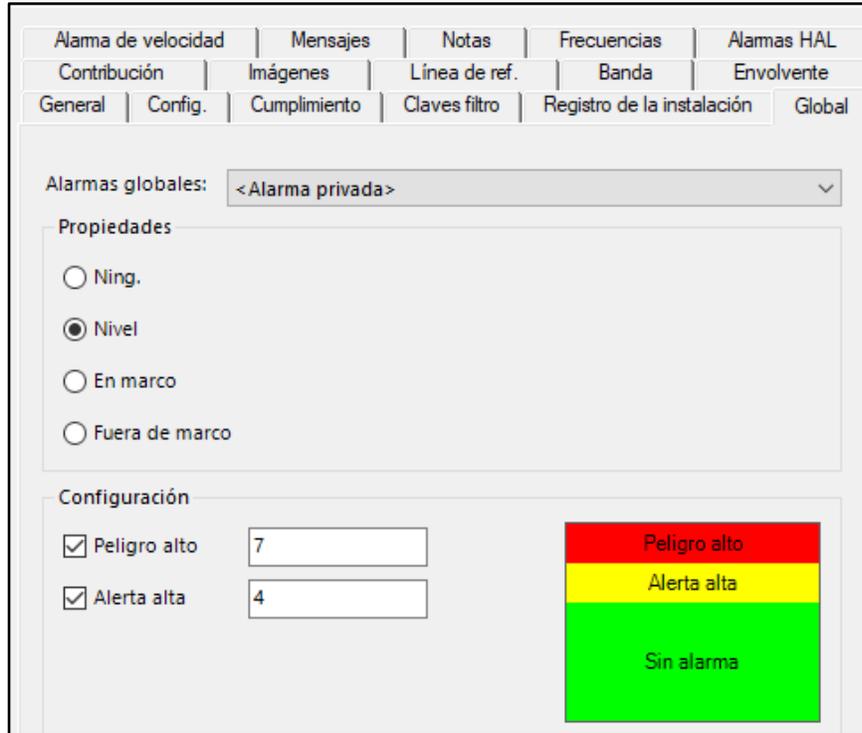


Figura 3.8: Configuración de alarmas para los puntos de velocidad. Fuente: Elaboración propia

3.5.2 Configuración de puntos de aceleración

La medición de aceleración es utilizada para medir el estado de engranajes y rodamientos, estos puntos solo serán medidos en la dirección vertical.

Paso 1: La primera configuración se realiza en la pestaña general, como se muestra en la figura 3.9, donde se debe crear el nombre del punto donde se realizará la medición y su descripción, luego se debe seleccionar la aplicación, en este paso se realizará la configuración para la aceleración, también se selecciona el tipo de sensor y las unidades correspondientes a la aceleración en este caso mm/s

Figura 3.9: Pestaña para la creación del punto de aceleración. Fuente: Elaboración propia

Paso 2: En la pestaña de configuración se debe seleccionar la frecuencia inicial y final la cual será de utilidad para la obtención de gráficos, en la pestaña de detección se selecciona RMS, se debe agregar la velocidad de trabajo del equipo.

En la tabla 3.6 se describen los arreglos que se deben realizar para la configuración de los puntos de aceleración.

Tabla 3.6: Configuraciones generales para los puntos de aceleración. Fuente: elaboración propia.

Frecuencia inicial	0 KCPM
Frecuencia final	60 KCPM
Detección	RMS
Guardar datos	FFT para aceleración
Velocidad	2000 rpm

De esta manera la configuración final para la medición de puntos de aceleración se observa en la figura 3.10.

Alarma de velocidad	Mensajes	Notas	Frecuencias	Alarmas HAL
Contribución	Imágenes	Línea de ref.	Banda	Envolvente
General	Config.	Cumplimiento	Claves filtro	Registro de la instalación
				Global

Escala máxima:	<input type="text" value="5"/>	g	Detección:	<input type="text" value="RMS"/>
Entrada mV/EU:	<input type="text" value="100"/>		<input checked="" type="checkbox"/> Activar ICP	
Tipo de frec.:	<input type="text" value="Intervalo fijo"/>		Líneas:	<input type="text" value="3200"/>
Guardar datos:	<input type="text" value="FFT"/>		Ventana:	<input type="text" value="Hanning"/>
Frec. inicial:	<input type="text" value="0"/>	kCPM	Autocaptura:	<input type="text" value="Siempre"/>
Frec. final:	<input type="text" value="60"/>	kCPM	Velocidad:	<input type="text" value="2000"/> RPM
Corte frec. baja:	<input type="text" value="1200"/>	CPM	Medias:	<input type="text" value="2"/>
Pulsos/Rev:	<input type="text" value="1"/>		Media:	<input type="text" value="Media"/>
Factor lineal:	<input type="text" value="0"/>		Unids. de vel. lineal:	<input type="text"/>

Figura 3.10: Pestaña de configuración de puntos de aceleración. Fuente: elaboración propia

Paso 3: Para realizar la configuración de las alarmas se debe realizar según la recomendación de la guía de configuración de puntos de aptitude_off_line de SKF para máquinas que giran sobre 400 rpm, donde los límites se especifican en la tabla 3.7.

Tabla 3.7: Configuración de alarmas para puntos de aceleración. Fuente (Barahona, 2017)

RPM > 400
Límite inferior = 0,5
Límite superior: 5

Por lo tanto, la configuración de las alarmas en la pestaña global se muestra en la figura 3.11

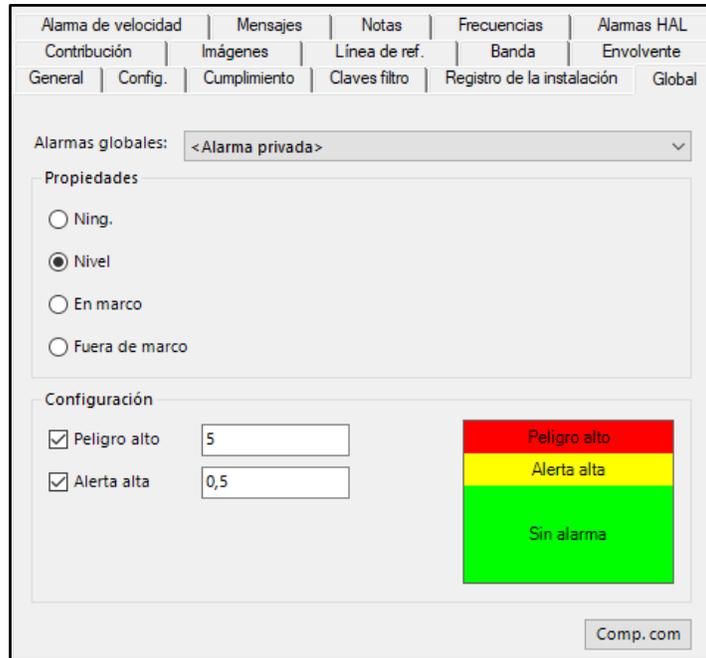


Figura 3.11: Configuración de las alarmas para los puntos de aceleración. Fuente: elaboración propia

3.5.3 Configuración para los puntos de envolverte de aceleración

Para realizar esta configuración se deben seguir los siguientes pasos:

Paso 1: Al igual que para la creación de puntos de aceleración, en este caso se debe escoger la pestaña general donde se debe incluir el punto de medición y su descripción, en este caso la aplicación es vibración, su unidad de medida es gE-RMS, en la figura 3.12 se muestra esta configuración.

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

The screenshot shows a software interface with a menu bar at the top containing: Alarma de velocidad, Mensajes, Notas, Frecuencias, Alarmas HAL, Contribución, Imágenes, Línea de ref., Banda, and Envolverte. Below the menu bar are tabs: General, Config., Cumplimiento, Claves filtro, Registro de la instalación, and Global. The 'Envolverte' tab is active, showing the following configuration fields:

- Nombre: Envolverte
- Descripción: Filtro envolvente lado libre mot
- Activar obtención de datos
- Tipo de DAD: Microlog Analyzer
- Aplicación: Vibración
- Tipo de sensor: Acelerómetro
- Unidades: gE
- Ubicación: [Empty field]
- Orientación: Ning.
- Solo incluir PUNTO en informes si se ha obtenido la última medición
- Borrar alarma para No obtención últimas mediciones.

Figura 3.12: Pestaña para configurar los puntos de la envolvente. Fuente: elaboración propia

Paso 2: En la pestaña configuraciones se selecciona la frecuencia inicial en 0, la frecuencia final en 60 Kcpm, la detección en este caso es RMS, la velocidad también se debe configurar en 2000 RPM.

En la figura 3.13 se muestra la configuración para los puntos de envolvente de aceleración.

The screenshot shows the 'Config.' tab in the software interface. The configuration fields are as follows:

- Escala máxima: 25 gE
- Entrada mV/EU: 100
- Detección: RMS
- Activar ICP
- Gama filtro entrada: 30K a 600K CPM
- Tipo de frec.: Intervalo fijo
- Líneas: 6400
- Guardar datos: FFT
- Ventana: Hanning
- Frec. inicial: 0 kCPM
- Autocaptura: Siempre
- Frec. final: 60 kCPM
- Velocidad: 2000 RPM
- Corte frec. baja: 0 CPM
- Medias: 2
- Pulsos/Rev: 1
- Media: Media
- Factor lineal: 0
- Unids. de vel. lineal: [Empty field]

Figura 3.13: Configuración de los puntos de la envolvente. Fuente: elaboración propia

Paso 3: La configuración de las alarmas se debe realizar siguiendo las recomendaciones de la guía de configuración de puntos de aptitude_off_line de SKF, en la tabla 3.8 se muestra la configuración de las alarmas.

Tabla 3.8: Configuración de alarmas para puntos de envolvente de aceleración. Fuente: (Barahona, 2017).

Alerta alta	0,5 gE
Peligro alto	10 gE

Por lo tanto, la configuración de las alarmas en la pestaña global se muestra en la figura 3.14

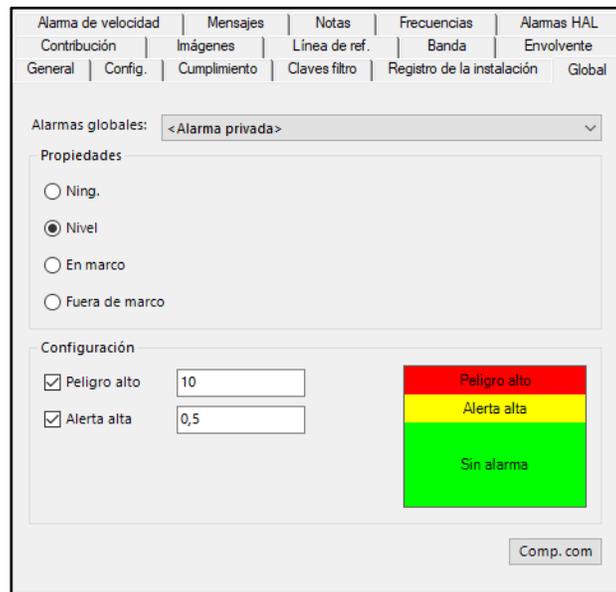


Figura 3.14: Configuración de alarmas para los puntos de envolvente. Fuente: elaboración propia

3.6 OBTENCIÓN DE DATOS

La primera toma de datos corresponde a los rodamientos en perfecto estado. Para la toma de datos se realizó un total de 10 mediciones en diferentes días, de esta toma de datos se obtuvieron los gráficos de tendencia que se muestran desde el punto 3.6.1, los gráficos de tendencia

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

seleccionados son los de velocidad mm/s-RMS ya que de esta manera se puede observar a través del tiempo si existe alguna condición extraña dentro del rodamiento.

Los gráficos más representativos al momento de analizar fallas en rodamientos corresponden a los que tengan mayores valores globales en promedio en amplitud, en la tabla 3.9 se muestran los valores globales de las velocidades que se obtuvieron para cada rodamiento en las distintas mediciones realizadas, de esta manera los valores más altos en promedio se obtuvieron en la dirección horizontal de cada punto de medición.

Tabla 3.9: Resumen de las mediciones de velocidad mm/s – RMS de cada punto. Fuente:

Elaboración propia

	Rodamiento	M1			M2		
Dirección	Fecha	Horizontal	Axial	Vertical	Horizontal	Axial	Vertical
Valores en velocidad mm/s-RMS	09-11-22	2,124	1,713	0,951	1,353	1,569	2,09
	18-10-22	1,082	0,946	2,688	1,099	0,53	1,168
	13-10-22	2,431	1,343	1,022	2,786	1,927	1,22
	12-09-22	2,47	1,494	0,883	3,164	1,928	1,532
	09-09-22	2,511	1,576	1,063	3,043	1,606	2,67
	08-09-22	2,597	1,435	0,879	3,065	1,849	1,707
	07-09-22	2,573	1,375	0,99	3,065	1,531	3,565
	06-09-22	2,84	1,917	1,299	2,315	1,381	2,149
	06-09-22	2,25	1,691	0,798	2,273	1,306	2,52
	02-09-22	2,575	1,695	0,872	3,02	1,804	1,807
Promedio		2,345	1,519	1,1445	1,514	2,043	1,913
	Rodamiento	D1			D2		
Dirección	Fecha	Horizontal	Axial	Vertical	Horizontal	Axial	Vertical
Valores en velocidad mm/s-RMS	09-11-22	0,677	0,575	1,554	1,518	0,538	0,803
	18-10-22	0,91	0,569	1,153	1,34	0,593	0,836
	13-10-22	2,368	0,938	2,091	3,061	0,967	2,781
	12-09-22	2,117	1,19	2,104	2,995	1,045	2,863
	09-09-22	2,324	1,049	2,009	2,948	0,965	2,672
	08-09-22	2,302	0,997	2,019	2,97	0,661	2,772
	07-09-22	2,39	1,038	1,964	2,43	0,995	2,725
	06-09-22	1,916	0,945	1,815	2,814	0,93	2,641
	06-09-22	1,929	0,993	1,598	2,746	1,046	2,733
	02-09-22	2,198	0,838	2,072	2,838	0,949	2,752
Promedio		1,838	2,566	0,869	2,566	1,613	2,358

3.6.1 Tendencias de vibraciones en los puntos del motor y el eje

En los rodamientos que están en el eje del motor solo se analizarán los gráficos de velocidad ya que estos miden el comportamiento del componente a través del tiempo representado en los gráficos de tendencia en el rodamiento, además de presentar los mayores valores globales.

En el gráfico 3.1 se muestra la tendencia obtenida para la medición de velocidad en la dirección horizontal del punto lado libre del motor (M1H).

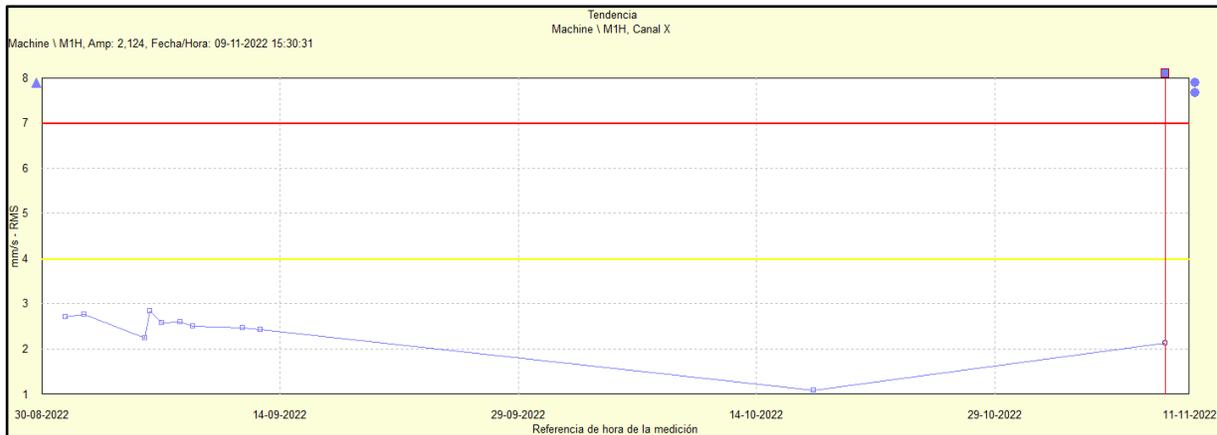


Gráfico 3.1: Gráfico de tendencia de velocidad mm/s-RMS punto lado libre del motor. Fuente: Elaboración propia

Cada punto de medición tiene su propia amplitud representada en velocidad mm/s-RMS la cual se indica en la tabla 3.10, el gráfico 3.1 presenta una tendencia estable donde las mediciones no sobrepasan la primera alarma.

Tabla 3.10: Amplitudes de las mediciones realizadas para el rodamiento M1H. Fuente: elaboración propia

Pos...	Fecha/Hora	∇	Global
1	09-11-2022 15:30:31		2,124 mm/s
2	18-10-2022 11:40:05		1,082 mm/s
3	13-09-2022 16:07:11		2,431 mm/s
4	12-09-2022 13:52:38		2,470 mm/s
5	09-09-2022 10:47:04		2,511 mm/s
6	08-09-2022 15:02:06		2,597 mm/s
7	07-09-2022 11:12:19		2,573 mm/s
8	06-09-2022 17:22:57		2,840 mm/s
9	06-09-2022 10:05:49		2,250 mm/s
10	02-09-2022 13:22:27		2,757 mm/s

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

En el gráfico 3.2 se muestra la tendencia de velocidad obtenida para el punto lado acoplamiento motor (M2H) en la dirección horizontal, la tendencia para esta medición mantiene un comportamiento estable para todos los puntos ya que ninguno de estos sobrepasa la primera línea de alarma.

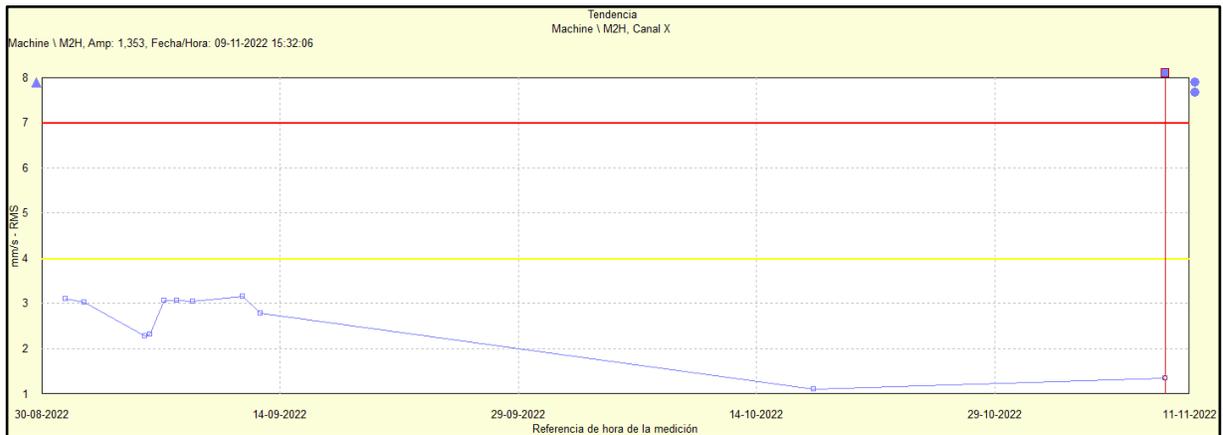


Gráfico 3.2: Gráfico de tendencia de velocidad mm/s-RMS punto lado acoplamiento del motor M2H. Fuente: Elaboración propia

La velocidad mm/s-RMS representada como amplitud para cada punto de medición en el gráfico 3.2 se detalla en la tabla 3.11 para cada medición.

Tabla 3.11: Tendencia velocidad en el punto lado acoplamiento del motor Fuente: Elaboración propia

Pos...	Fecha/Hora	↕	Global
🕒 1	09-11-2022 15:32:06		1,353 mm/s
🕒 2	18-10-2022 11:41:59		1,099 mm/s
🕒 3	13-09-2022 16:08:38		2,786 mm/s
🕒 4	12-09-2022 13:54:17		3,164 mm/s
🕒 5	09-09-2022 10:48:19		3,043 mm/s
🕒 6	08-09-2022 10:03:21		3,065 mm/s
🕒 7	07-09-2022 15:03:21		3,065 mm/s
🕒 8	06-09-2022 17:24:46		2,315 mm/s
🕒 9	06-09-2022 10:07:10		2,273 mm/s
🕒 10	02-09-2022 13:24:12		3,020 mm/s

3.6.2 Tendencias de vibraciones en los rodamientos del eje

Espectros en aceleración

En el gráfico 3.3 se muestra la tendencia de velocidad obtenida de la medición en el descanso del eje lado acoplamiento en la dirección horizontal (D1H).



Gráfico 3.3: Gráfico de tendencia de velocidad mm/s-RMS descanso lado acoplamiento D1 .

Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 3.3 se observa que la vibración en velocidad se mantiene en un rango estable de amplitud entre 0 y 3 mm/s – RMS durante todas las mediciones, observando este gráfico se concluye que el rodamiento tiene un correcto funcionamiento, ya que en ninguna medición alcanza el nivel de la primera alarma.

En la tabla 3.12 se muestran con mayor detalle los valores de velocidad obtenidos para cada medición realizada en el descanso D1.

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

Tabla 3.12: Amplitudes de las mediciones realizadas para el descanso D1 en la dirección horizontal Fuente: elaboración propia

Pos...	Fecha/Hora	∇	Global
1	09-11-2022 15:33:59		0,677 mm/s
2	18-10-2022 11:43:37		0,910 mm/s
3	13-09-2022 16:10:12		2,368 mm/s
4	12-09-2022 13:55:54		2,117 mm/s
5	09-09-2022 10:49:43		2,324 mm/s
6	08-09-2022 10:04:47		2,302 mm/s
7	07-09-2022 11:15:27		2,390 mm/s
8	06-09-2022 17:26:25		1,916 mm/s
9	06-09-2022 10:08:56		1,929 mm/s
10	02-09-2022 13:25:43		2,198 mm/s

En el gráfico 3.4 se muestra la tendencia de velocidad obtenida de la medición en el descanso lado libre en la dirección horizontal (D2H).

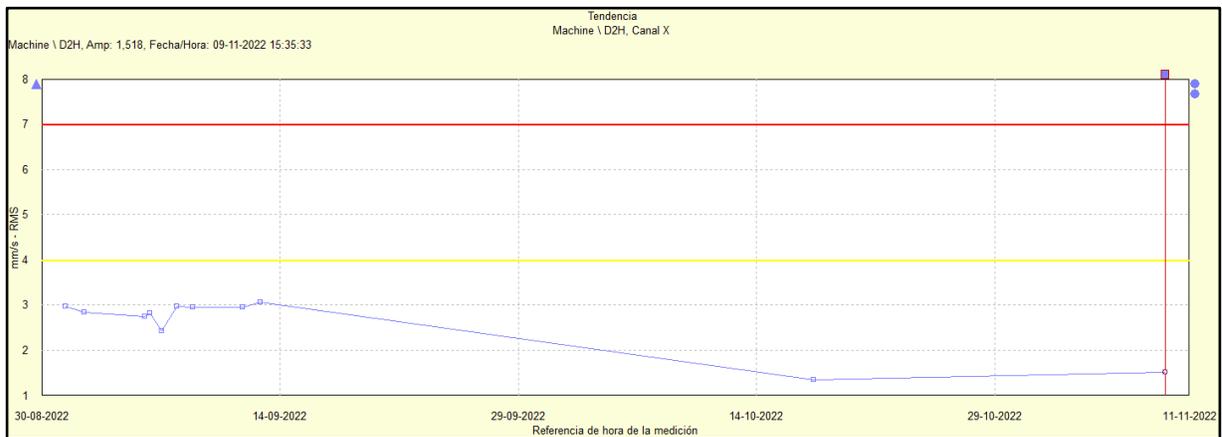


Gráfico 3.4: Gráfico de tendencia de velocidad mm/s-RMS descanso lado libre D2. Fuente: Elaboración propia.

Las mediciones de velocidad mostradas en el gráfico 3.4 indican que durante las mediciones el rodamiento D2 no presentó alguna señal de falla, debido a que las mediciones siempre estuvieron bajo la línea de la primera alarma.

En la tabla 3.13 se muestran los valores de velocidad para cada medición realizada al rodamiento D2.

Tabla 3.13: Amplitudes de las mediciones en velocidad realizadas para el descanso D2 en la dirección horizontal Fuente: elaboración propia

Pos...	Fecha/Hora	∇	Global
1	10-11-2022 13:34:19		1,787 mm/s
2	09-11-2022 15:35:33		1,518 mm/s
3	18-10-2022 11:45:00		1,340 mm/s
4	13-09-2022 16:11:29		3,061 mm/s
5	12-09-2022 13:57:05		2,955 mm/s
6	09-09-2022 10:50:58		2,948 mm/s
7	08-09-2022 10:06:12		2,970 mm/s
8	07-09-2022 11:17:03		2,430 mm/s
9	06-09-2022 17:28:00		2,814 mm/s
10	06-09-2022 10:10:24		2,746 mm/s

Espectros en aceleración

En el gráfico 3.5 se observa la tendencia en aceleración de las mediciones realizadas en el descanso lado libre D2.

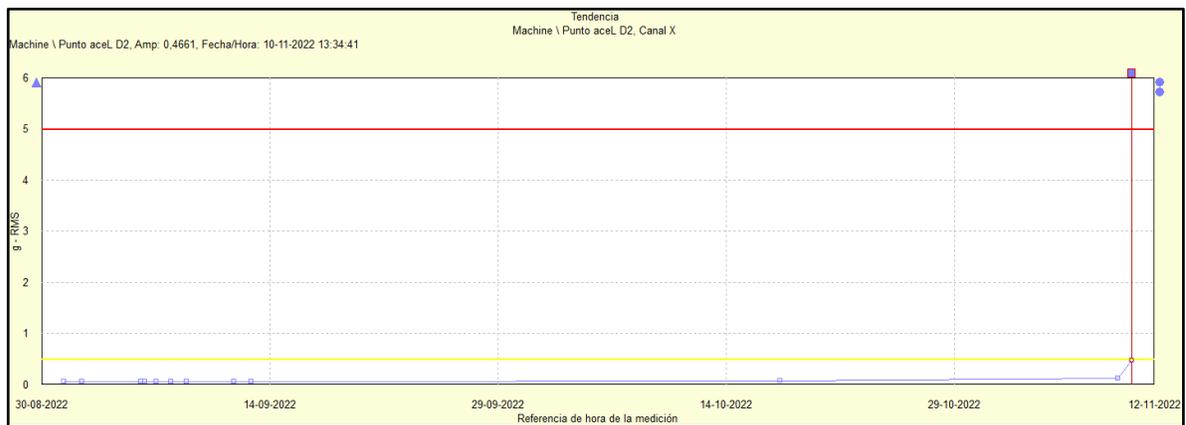


Gráfico 3.5: Tendencia en aceleración g-RMS para el descanso lado libre D2. Fuente: elaboración propia.

Los valores de amplitud en aceleración se mantienen estable hasta llegar al último punto de medición el cual corresponde a la aparición incipiente de la falla, llegando esta última medición cerca de la primera alarma.

En la tabla 3.14 se muestran los valores en amplitud para cada medición realizada en el descanso lado libre D2.

Tabla 3.14:Amplitudes de cada medición realizada en el descanso lado libre D2. Fuente: elaboración propia

P	Fecha/Hora	Global
1	10-11-2022 13:34:41	0,466 g
2	09-11-2022 15:35:54	0,117 g
3	18-10-2022 11:45:20	0,073 g
4	13-09-2022 16:11:43	0,057 g
5	12-09-2022 13:57:18	0,056 g
6	09-09-2022 10:51:12	0,052 g
7	08-09-2022 10:06:27	0,054 g
8	07-09-2022 11:17:20	0,050 g
9	06-09-2022 17:28:16	0,048 g
10	06-09-2022 10:10:40	0,049 g
11	02-09-2022 13:27:13	0,056 g
12	01-09-2022 9:39:48	0,055 g

En esta primera etapa de mediciones los rodamientos del eje están en buenas condiciones, para poder simular la aparición de una falla incipiente se debe realizar el cambio de los rodamientos para realizarle el daño al elemento rodante, este cambio de rodamientos se realiza para posteriormente poder dejar el equipo operativo con los rodamientos en buenas condiciones. Se realizará un análisis espectral para saber cómo se encuentra el estado de los nuevos rodamientos.

La forma de conocer el estado de los rodamientos es mediante las frecuencias de fallas fundamentales que se producen cuando los elementos rodantes pasan por una anomalía en alguna de las pistas o en el propio elemento rodante. (Flores, Andres, Erwin, & Jorge, 2020).

3.7 PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR EL DAÑO AL RODAMIENTO

El equipo machine fault simulator posee 2 pares de carcasas donde se encuentran los rodamientos del eje, el primer par corresponde a los rodamientos en buen estado con los cuales trabaja el equipo en condiciones normales, el segundo par de rodamientos está destinado para realizar el análisis de fallas ya que estos serán usados exclusivamente con el fin de ser dañados. Para realizar el daño al elemento rodante se debe seguir el siguiente procedimiento:

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

Paso 1: El rodamiento seleccionado para dañar uno de sus elementos rodantes es el rodamiento lado libre (D2), para lo cual, el rodamiento debe extraerse de su carcasa, la carcasa debe ser sujeta en un banco de mesa para soltar los 2 pernos que se encuentran en la zona superior con una llave allen 5/16” de esta manera el rodamiento puede ser desmontado de la carcasa como se muestra en la figura 3.15

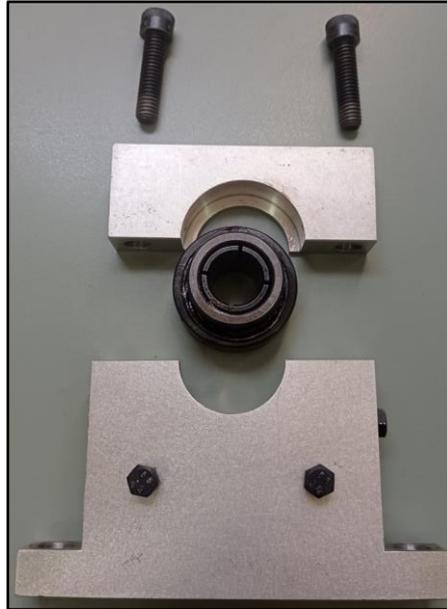


Figura 3.15: Carcasa abierta para retirar el rodamiento. Fuente: elaboración propia

Paso 2: se debe retirar el sello de labios el cual puede ser retirado solamente con los dedos, teniendo cuidado de no dañarlo, retirado el sello, los elementos rodantes quedan a la vista como se observa en la figura 3.16



Figura 3.16: Rodamiento con los elementos rodantes a la vista. Fuente: Elaboración propia

Paso 3: con la ayuda de un limpiador disolvente se realiza la limpieza del interior del rodamiento para eliminar los excesos de lubricante para poder realizar el daño al elemento.

Paso 4: el daño se realiza en la superficie de una de las bolas ayudada de un dremel el cual cuenta con una punta de diamante que es indicada para realizar tallado en superficies duras (Quest, 2015). En la figura 3.17 se observa el elemento rodante sin daño y en la figura 3.18 se observa el elemento rodante con el daño superficial.



Figura 3.17: Elemento rodante sin daño superficial. Fuente: Elaboración propia

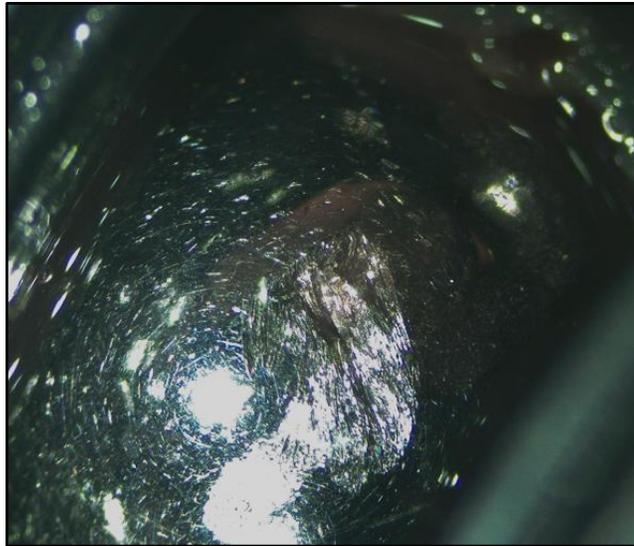


Figura 3.18: Elemento rodante dañado en su superficie. Fuente: elaboración propia

Paso 5: Ya realizado el daño al elemento rodante se debe lubricar el rodamiento para volver a poner el sello de labios y montarlo en la carcasa.

Paso 6: Para realizar el cambio de las carcasas que están en el eje, se deben soltar los tornillos basales con una llave allen 5/16” para que puedan ser retiradas del eje, junto a esto se debe soltar el tornillo del acoplamiento para dejar el eje libre y poder extraer las carcasas.

Paso 7: el eje debe ser introducido dentro de los nuevos rodamientos que están en las carcasas y ubicarlos en la base donde están las perforaciones para los tornillos basales, se deben conectar ambos ejes con el acoplamiento y realizar el apriete de su tornillo.

Paso 8: Finalmente el equipo se pone en marcha progresivamente hasta alcanzar los 2000 rpm, con lo cual se vuelven a medir las vibraciones, para detectar si el daño realizado es el inicio de una falla incipiente.

3.8. ANÁLISIS RODAMIENTO D2 CON FALLA

Para poder conocer si el daño realizado al elemento rodante ha generado la aparición de una falla incipiente se debe analizar la frecuencia de deterioro de los elementos rodantes presentes

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

en el espectro aceleración y compararlos con las frecuencias de deterioro de los elementos rodantes (BSF) obtenidos de la ecuación 22.

$$BSF = \frac{RPM * d_m}{2d} \left[1 - \left(\frac{d}{d_m} \right)^2 \cos^2 \beta \right]$$

Donde:

Variable	Descripción	Valor
RPM	Velocidad de giro	2000 RPM
d	Diámetro elemento rodante	7,145 mm
β	Ángulo de contacto de los elementos rodantes	0°
dm	Diámetro primitivo	33 mm

$$BSF = \frac{2000 * 33}{2 * 7,145} \left[1 - \left(\frac{7,145}{33} \right)^2 \cos^2 0 \right]$$

BSF= 4832,3 CPM

El valor obtenido de la frecuencia de deterioro de los elementos rodantes es de 4842,3 CPM, este valor corresponde a la primera frecuencia (1x) de giro del elemento rodante.

En el gráfico 3.6 se observa el espectro en aceleración del rodamiento D2, donde se destacan las frecuencias de giro de los elementos rodantes.

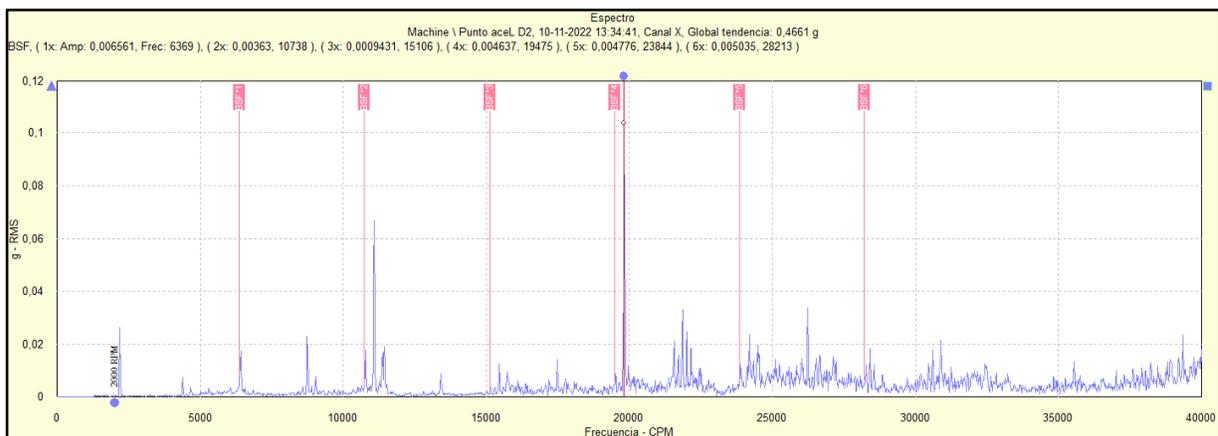


Gráfico 3.6: Espectro de aceleración del rodamiento dañado obtenido del software microlog analyser. Fuente: elaboración propia

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

En la tabla 3.15 se detallan las amplitudes de aceleración para cada frecuencia de giro de los elementos rodantes.

Tabla 3.15: Amplitudes de los puntos de aceleración del rodamiento D2 con falla. Fuente: elaboración propia

Armónico	Frecuencia	Amplitud
1	6369	0,006561
2	10738	0,00363
3	15106	0,0009431
4	19475	0,004637
5	23844	0,004776

En la tabla 3.16 se realiza una comparación entre los valores del BSF obtenidos con la ecuación 22 y los valores que presenta el espectro de aceleración del gráfico 3.6.

Tabla 3.16: Comparación de las frecuencias obtenidas directamente del software y las frecuencias obtenidas de la ecuación 22. Fuente: elaboración propia

Descripción	Frecuencia rodamiento con falla (CPM)	Amplitud (g-RMS)	Frecuencias obtenidas de fórmula (CPM)
BSF D2	6369	0,0065	4832,3
	10738	0,00363	8804,19
	15106	0,0094	13206,29
	19475	0,0046	17608,397

En la tabla 3.16 se observa que las frecuencias de los rodamientos con falla obtenidas del espectro de aceleración son valores cercanos a los armónicos correspondiente a los valores obtenidos de la ecuación 22, la diferencia que existe entre valores se debe a que las condiciones de funcionamiento para el equipo son reales donde se deben considerar factores mecánicos de los componentes, variación en las mediciones realizadas con los distintos equipos además de considerar que el equipo de simulación es de origen estadounidense y el equipo de adquisición de datos y el software de análisis es europeo, por lo cual ya se produce una diferencia en lo que se refiere a las unidades de medición y los valores que entrega la ecuación 22 son valores teóricos en condiciones ideales donde no se consideran condiciones extras.

3.9 RESPUESTA VIBRATORIA DEL RODAMIENTO

Para poder desarrollar los objetivos específicos 2 y 3 se debe realizar el análisis de la respuesta vibratoria para el rodamiento antes de la falla y después de realizada la falla.

3.9.1 Análisis espectral del rodamiento D2 antes de la falla

Para poder cumplir con el objetivo específico 2 se debe realizar el análisis de la respuesta vibratoria en aceleración g – RMS obtenida del rodamiento D2 sin fallas.

El espectro utilizado para conocer el estado de un rodamiento corresponde a la aceleración el cual se observa en el gráfico 3.7.

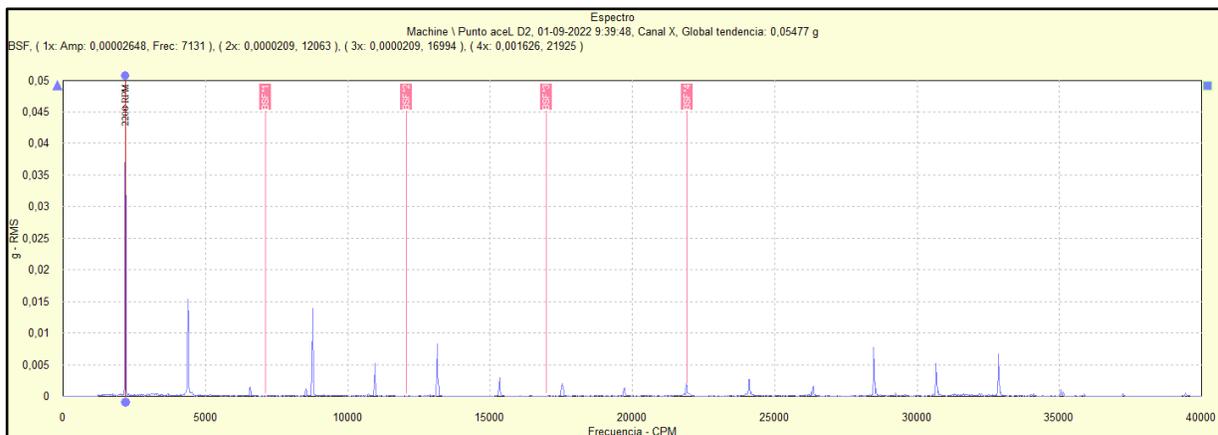


Gráfico 3.7: Gráfico espectro de aceleración rodamiento D2 sin falla. Fuente: elaboración propia

En la tabla 3.17 se muestran las amplitudes para cada frecuencia de medición de aceleración para el rodamiento D2 sin falla.

Tabla 3.17:Tabla correspondiente a las frecuencias y amplitudes del espectro de aceleración del rodamiento D2 sin falla. Fuente: elaboración propia

Armónico	Frecuencia	Amplitud
1	6931	0,00005157
2	11863	0,00003345
3	16794	0,0000446
4	21725	0,0001031
5	26656	0,0000209

En la tabla 3.18 se realiza una comparación entre los valores del BSF obtenidos con la ecuación 22 y los valores que presenta el espectro de aceleración del gráfico 3.7, donde se observa que la amplitud de las frecuencias obtenidas del software disminuye significativamente lo que demuestra que el rodamiento no presenta ninguna falla.

Tabla 3.18: Comparación frecuencias rodamiento sin falla y frecuencias obtenidas por fórmula. Fuente: elaboración propia

Descripción	Frecuencia rodamiento sin falla (CPM)	Amplitud (g-RMS)	Frecuencias obtenidas de fórmula (CPM)
BSF D2	6931	0,00005157	4402,099
	11863	0,00003345	8804,19
	16794	0,0000446	13206,29
	21725	0,0001031	17608,397

En la tabla 3.18 se observa que las amplitudes de cada armónico presentan un valor muy pequeño lo cual indica que los elementos rodantes al momento de girar no producen energía de impacto, de esta manera se puede concluir que el rodamiento aún no presenta falla

3.9.2 Análisis espectral del rodamiento D2 con falla

En el gráfico 3.8 se observa la respuesta vibratoria obtenida para el rodamiento que presenta daño en sus elementos rodantes.

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

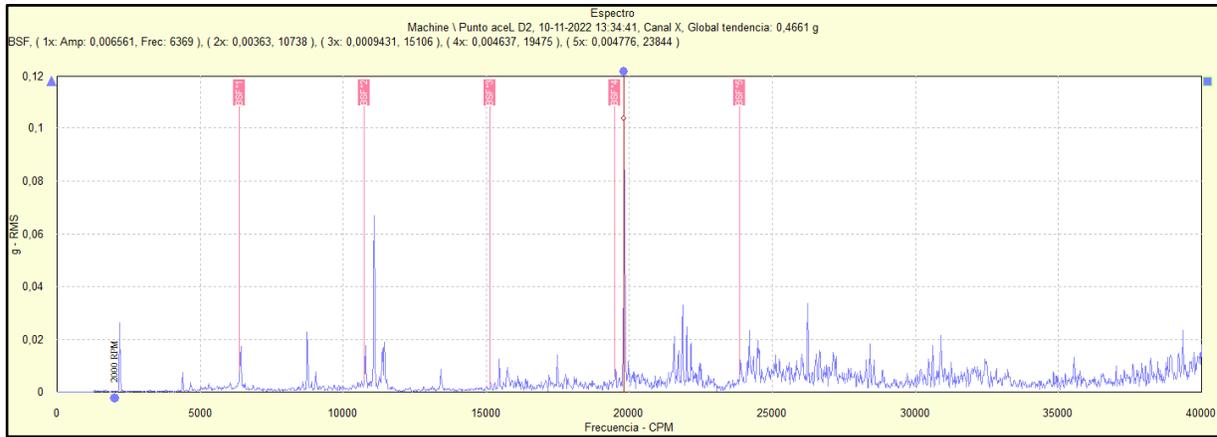


Gráfico 3.8: espectro vibratorio del rodamiento D2 con falla. Fuente: elaboración propia.

En la tabla 3.19 se muestran las amplitudes de cada punto de medición para la aceleración del rodamiento D2 con falla.

Tabla 3.19: Amplitudes de los puntos de aceleración del rodamiento D2 con falla. Fuente: elaboración

Armónico	Frecuencia	Amplitud
1	6369	0,006561
2	10738	0,00363
3	15106	0,0009431
4	19475	0,004637
5	23844	0,004776

En la tabla 3.20 se muestra la comparación de las frecuencias y amplitudes del rodamiento antes de la falla y después de la falla, además de las frecuencias obtenidas directamente de la ecuación 22.

Tabla 3.20: Tabla comparativa de las frecuencias y amplitudes antes y después de la falla. Fuente: elaboración propia

Descripción	Frecuencia rodamiento sin falla (CPM)	Amplitud (g-RMS)	Frecuencia rodamiento con falla (CPM)	Amplitud (g-RMS)	Frecuencias obtenidas de fórmula (CPM)
BSF D2	6931	0,000026	6369	0,0065	4832,31
	11863	0,000020	10738	0,00363	9684,62
	16794	0,000020	15106	0,0094	14526,93
	21725	0,001620	19475	0,0046	19369,24

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

Las frecuencias obtenidas del rodamiento con falla son más cercanas a las frecuencias del BSF obtenido directamente con la ecuación 22 y a mayor frecuencia estos valores se asemejan aún más, además se observa que la amplitud a la cual se producen estas frecuencias es mayor que para la frecuencia del rodamiento sin falla, lo cual indica que existe mayor energía de impacto. La diferencia que existe entre valores se debe a que las condiciones de funcionamiento para el equipo son reales donde se deben considerar factores mecánicos de los componentes, variación en las mediciones realizadas con los distintos equipos además de considerar que el equipo de simulación es de origen estadounidense y el equipo de adquisición de datos y el software de análisis es europeo, por lo cual ya se produce una diferencia en lo que se refiere a las unidades de medición.

El espectro de aceleración es utilizado para revisar el estado del rodamiento, en el gráfico 3.9 se muestra el estado del rodamiento a través de las distintas mediciones realizadas, donde se observa que en la última medición correspondiente al momento en que aparece la falla en el componente el estado del rodamiento se acerca a la primera alarma.

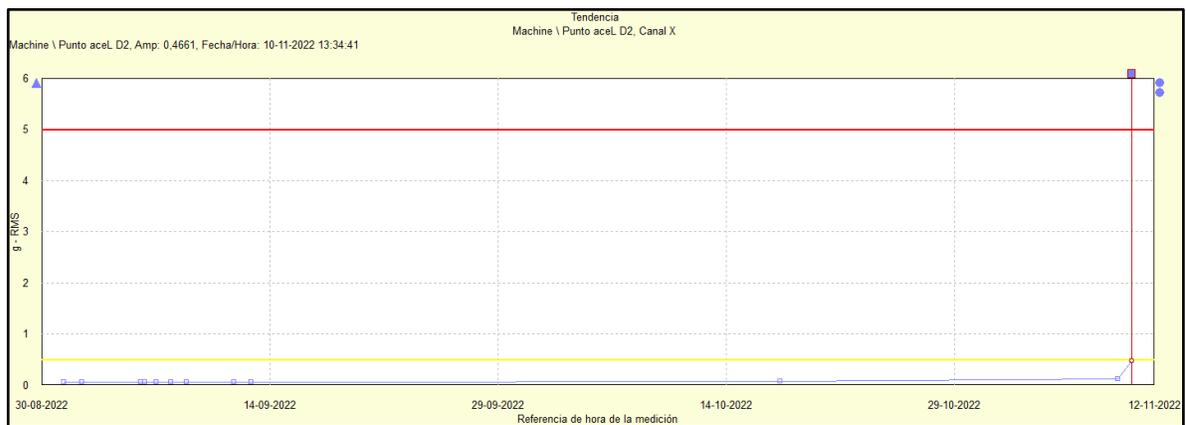


Gráfico 3.9: Estado del rodamiento a través del tiempo. Fuente: elaboración propia

3.10 ANÁLISIS DE FALLAS UTILIZANDO LA TÉCNICA DE LA ENVOLVENTE

La técnica de la envolvente de la aceleración es utilizada para detectar de manera temprana defectos en los elementos rodantes de los rodamientos, dentro del espectro de frecuencias se encuentran las frecuencias naturales de giro del eje del motor junto a esto también aparecen las

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

frecuencias asociadas a las fallas en los elementos rodantes, el problema es que estas frecuencias son de menor amplitud que las frecuencias del equipo, lo que hace aún más difícil la detección de fallas iniciales del rodamiento, una manera de poder detectar estas frecuencias es utilizando la técnica de la envolvente de la aceleración.

Demodulación de la señal

La demodulación de la señal es utilizada en el análisis espectral para detectar fallas en los elementos rodantes del rodamiento. La demodulación usa filtros pasa altos los se encargan de filtrar los datos de bajas frecuencias de esta manera se pueden obtener los valores de bajo nivel de vibración a alta frecuencia (cita)

La técnica de la envolvente es utilizada para el procesamiento de la señal de vibración. Con la cual se detectaron problemas del elemento rodante del rodamiento en etapas tempranas de daño (Rodríguez).

En el gráfico 3.10 se muestra el espectro de envolvente de aceleración obtenido para el rodamiento dañado, al observar el gráfico se puede distinguir que existe una alta energía de vibración a una frecuencia de 2184 CPM, además el daño presente en el elemento rodante produce impactos dentro del rodamiento lo que genera pequeñas amplitudes a muy altas amplitudes, lo que puede entenderse como el sonido que produce una campana al ser golpeada, con el análisis realizado al espectro de vibraciones y aceleración se estableció que la falla presente en el rodamiento provenía de los elementos rodantes.

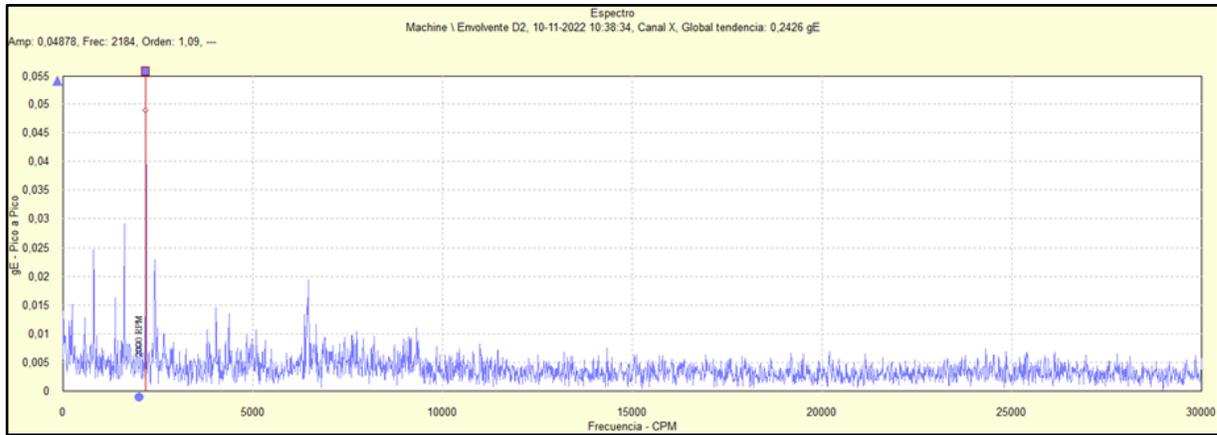


Gráfico 3.10: tendencia obtenida de las mediciones realizadas con el filtro de la envolvente para las distintas mediciones realizadas al rodamiento D2.

3.11 FACTOR CRESTA

El factor cresta se obtiene de la división entre el valor peak y el valor RMS de la vibración, como se muestra a continuación:

El valor peak corresponde a la máxima amplitud de las mediciones de velocidad obtenidas en el rodamiento D2, de la tabla 3.21 se extrae el valor peak el cual fue obtenido el 13-09-2022 con un valor de 3,061 mm/s.

Tabla 3.21: Tabla de valores de velocidad rodamiento D2. Fuente: elaboración propia

Pos...	Fecha/Hora	ζ	Global
1	10-11-2022 13:34:19		1,787 mm/s
2	09-11-2022 15:35:33		1,518 mm/s
3	18-10-2022 11:45:00		1,340 mm/s
4	13-09-2022 16:11:29		3,061 mm/s
5	12-09-2022 13:57:05		2,955 mm/s
6	09-09-2022 10:50:58		2,948 mm/s
7	08-09-2022 10:06:12		2,970 mm/s
8	07-09-2022 11:17:03		2,430 mm/s
9	06-09-2022 17:28:00		2,814 mm/s
10	06-09-2022 10:10:24		2,746 mm/s

Primero se realizará el procedimiento para obtener el factor cresta antes de la aparición de la falla, por lo tanto, no será considerada la medición en la cual ocurrió la aparición de la falla la cual se produjo en la medición realizada el 10-11-2022

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

Ya teniendo los datos suficientes se puede obtener el factor cresta como se muestra a continuación:

El primer paso es obtener el valor RMS:

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1,518^2 + 1,34^2 + 3,061^2 + 2,995^2 + 2,948^2 + 2,97^2 + 2,43^2 + 2,814^2 + 2,746^2}{9}}$$

$$\text{RMS} = 2,6 \text{ mm/s}$$

$$\text{Factor cresta} = \frac{3,061 \text{ mm/s}}{2,6 \text{ mm/s}} = 1.17$$

Ahora se realizará el cálculo del factor cresta considerando la medición realizada en el momento que se apareció la falla

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1,787^2 + 1,518^2 + 1,34^2 + 3,061^2 + 2,995^2 + 2,948^2 + 2,97^2 + 2,43^2 + 2,814^2 + 2,746^2}{10}}$$

$$\text{RMS} = 2,54 \text{ mm/s}$$

$$\text{Factor cresta} = \frac{3,061 \text{ mm/s}}{2,54 \text{ mm/s}} = 1.2$$

Finalmente se obtiene el factor RMS y el factor cresta para las mediciones realizadas antes de la aparición de la falla y después considerando la falla, en la tabla 3.22 se observa el resumen de los valores obtenidos.

Tabla 3.22: Resumen valores RMS y factor Cresta antes y después de la falla. Fuente:

Elaboración propia.

Antes de la falla		Después de la falla	
RMS mm/s	Factor cresta	RMS mm/s	Factor cresta
2,6	1,17	2,54	1,2

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

A medida que el defecto comienza a desarrollarse el valor del factor cresta comienza a aumentar. El factor cresta es utilizado para detectar y ver el desarrollo de fallas, en el momento de la aparición de la falla se aprecia un aumento en el valor del factor cresta, y a medida que el fallo incrementa en el tiempo este valor también crece.

3.12 SEVERIDAD VIBRACIONAL DEL RODAMIENTO CON Y SIN FALLAS A TRAVÉS DE LA NORMA ISO 2372.

La norma ISO 2372 se encarga de evaluar la vibración en partes no rotativas de máquinas cuya potencia es menor a 15 Kw.

El parámetro vibratorio utilizado para el análisis de severidad corresponde a la velocidad ya que esta permite detectar en el periodo que se realizaron las mediciones si existe alguna medición que sobresalga en amplitud.

Para poder realizar el análisis con la norma ISO 2372 es necesario clasificar el tipo de máquina con la cual se está trabajado según los siguientes parámetros:

-Tipo de máquina

La clasificación de la máquina según la tabla 2.3, es una máquina clase 1 con potencia menor a 15 Kw.

Valor RMS

El valor RMS de la velocidad permite darle un valor de severidad según sea el estado del daño del rodamiento. Para el caso del rodamiento D2 los valores para obtener el RMS fueron los valores globales de velocidad los que se muestran en la tabla 3.23

Tabla 3.23: Valores de velocidad globales del rodamiento D2 utilizados para calcular el valor RMS. Fuente: elaboración propia.

Pos...	Fecha/Hora	∇	Global
1	10-11-2022 13:34:19		1,787 mm/s
2	09-11-2022 15:35:33		1,518 mm/s
3	18-10-2022 11:45:00		1,340 mm/s
4	13-09-2022 16:11:29		3,061 mm/s
5	12-09-2022 13:57:05		2,955 mm/s
6	09-09-2022 10:50:58		2,948 mm/s
7	08-09-2022 10:06:12		2,970 mm/s
8	07-09-2022 11:17:03		2,430 mm/s
9	06-09-2022 17:28:00		2,814 mm/s
10	06-09-2022 10:10:24		2,746 mm/s

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1,787^2 + 1,518^2 + 1,34^2 + 3,061^2 + 2,995^2 + 2,948^2 + 2,97^2 + 2,43^2 + 2,814^2 + 2,746^2}{10}}$$

$$\text{RMS} = 2,54 \text{ mm/s}$$

De esta manera ya es posible establecer la severidad del rodamiento con la información del equipo y el valor RMS que se obtuvo con los valores globales de velocidad.

En la tabla 3.24 se muestran las condiciones del equipo necesarias para realizar la evaluación en la tabla de severidad.

Tabla 3.24: Resumen condiciones del equipo para evaluar severidad. Fuente: elaboración propia

Velocidad RMS mm/s	2,54
Categorización máquina	Clase I

De esta manera según la norma ISO 2372 el componente analizado se encuentra en la categoría C como se muestra en la tabla 3.25.

Tabla 3.25:Tabla de severidad para clasificar el componente analizado. Fuente: (Saavedra, Curso Análisis de vibraciones de máquinas rotatorias nivel I, 2009)

Rango de velocidad efectiva ó RMS (mm/s)	Tipos de Máquinas			
	Clase I	Clase II	Clase III	Clase IV
0,18 - 0,28	A	A	A	A
0,28 - 0,45				
0,45 - 0,71				
0,71 - 1,12	B	B	B	
1,12 - 1,8				
1,8 - 2,8	C	C	B	
2,8 - 4,5	D	C	C	
4,5 - 7,1				
7,1 - 11,2		D	D	C
11,2 - 18	D	D	D	
18 - 28				

Realizando el análisis de severidad del componente este se encuentra en estado insatisfactorio, lo que indica que el componente presenta un mal estado de funcionamiento, pero aún no produce fallo.

3.12.1 Severidad vibracional del rodamiento

Para poder estimar la severidad vibracional que presenta el rodamiento se utilizó la tabla de severidad de la norma ISO 2372, al tratarse de una falla incipiente la cual está en su etapa inicial de desarrollo, aún no es posible diferenciar un estado de severidad el estado del rodamiento antes de la aparición de la falla incipiente y cuando está ya se produjo mediante esta tabla, la

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

forma de poder apreciar que se está ante una falla incipiente es analizando el espectro de aceleración como se muestra en el gráfico 3.11.

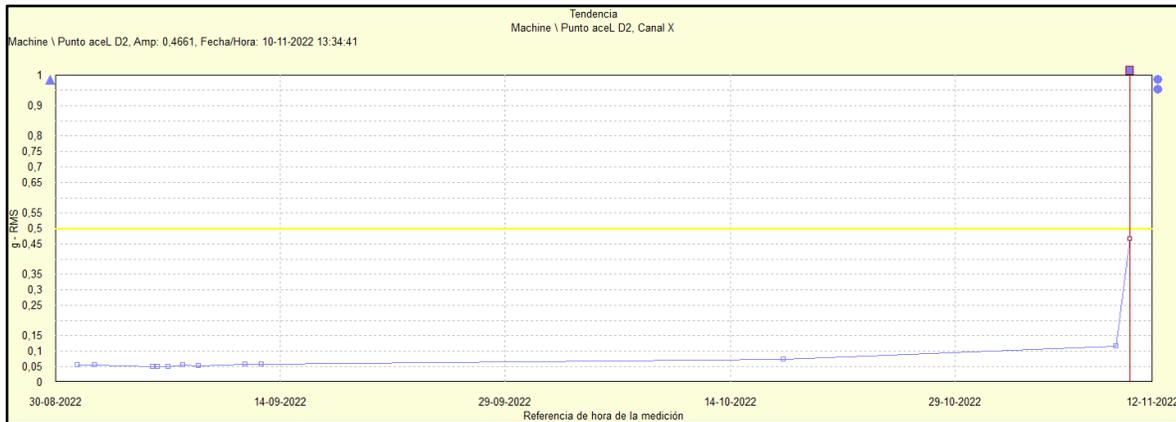


Gráfico 3.11: Tendencia en aceleración rodamiento D2 hasta la aparición de la falla incipiente.

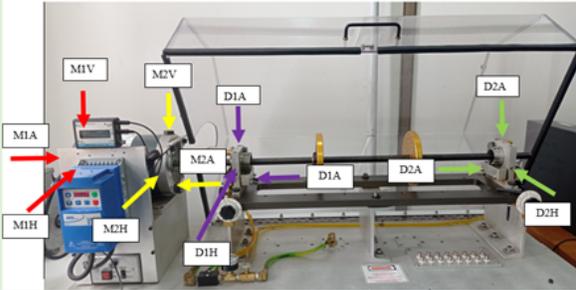
Fuente: elaboración propia.

En el gráfico 3.11 se observa que en la última medición se produjo un aumento de la amplitud en aceleración, lo cual indica el inicio del desarrollo de una falla o aparición de una falla incipiente. En la tabla 3.26 se muestra como aumentó el valor de la aceleración al momento de aparecer la falla la cual ocurrió el 10-11-2022.

Tabla 3.26: Amplitudes en aceleración del rodamiento D2. Fuente: elaboración propia

P	Fecha/Hora	Global
1	10-11-2022 13:34:41	0,466 g
2	09-11-2022 15:35:54	0,117 g
3	18-10-2022 11:45:20	0,073 g
4	13-09-2022 16:11:43	0,057 g
5	12-09-2022 13:57:18	0,056 g
6	09-09-2022 10:51:12	0,052 g
7	08-09-2022 10:06:27	0,054 g
8	07-09-2022 11:17:20	0,050 g
9	06-09-2022 17:28:16	0,048 g
10	06-09-2022 10:10:40	0,049 g
11	02-09-2022 13:27:13	0,056 g
12	01-09-2022 9:39:48	0,055 g

3.11 INFORME DIAGNÓSTICO DE FALLOS PARA EL ANÁLISIS OBTENIDO DE VIBRACIONES REALIZADA AL EQUIPO MACHINE FAULT SIMULATOR.

Informe de diagnostico rodamiento descanso lado libre D2																																																						
DATOS GENERALES DEL EQUIPO																																																						
Descripción del equipo	Simulador				Norma de evaluación	ISO 2372																																																
Tag del equipo	001 - M1				Clase del equipo	Clase 1																																																
Velocidad nominal	2850 RPM				Instrumeto de medición	Microlog analyser																																																
Potencia nominal	0,56 KW				Tipo de acelerometro	Piezoeléctrico 100 mV/g																																																
Voltaje nominal	190/380				Tipo de medición	Velocidad RMS mm/s																																																
ESQUEMA DE MEDICIÓN																																																						
					<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr style="background-color: #92d050;"> <th colspan="3">MEDICIONES</th> </tr> <tr> <th style="width: 15%;">Punto</th> <th style="width: 55%;">Ubicación</th> <th style="width: 30%;">Dirección</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>M1H</td><td>Lado libre motor</td><td>Horizontal</td></tr> <tr><td>M1A</td><td>Lado libre motor</td><td>Axial</td></tr> <tr><td>M1V</td><td>Lado libre motor</td><td>Vertical</td></tr> <tr><td>M2H</td><td>Lado acoplamiento motor</td><td>Horizontal</td></tr> <tr><td>M2A</td><td>Lado acoplamiento motor</td><td>Axial</td></tr> <tr><td>M2V</td><td>Lado acoplamiento motor</td><td>Vertical</td></tr> <tr><td>D1H</td><td>Descanso lado acoplamiento</td><td>Horizontal</td></tr> <tr><td>D1A</td><td>Descanso lado acoplamiento</td><td>Axial</td></tr> <tr><td>D1V</td><td>Descanso lado acoplamiento</td><td>Vertical</td></tr> <tr><td>D2H</td><td>Descanso lado libre</td><td>Horizontal</td></tr> <tr><td>D2A</td><td>Descanso lado libre</td><td>Axial</td></tr> <tr><td>D2V</td><td>Descanso lado libre</td><td>Vertical</td></tr> </tbody> </table>								MEDICIONES			Punto	Ubicación	Dirección	M1H	Lado libre motor	Horizontal	M1A	Lado libre motor	Axial	M1V	Lado libre motor	Vertical	M2H	Lado acoplamiento motor	Horizontal	M2A	Lado acoplamiento motor	Axial	M2V	Lado acoplamiento motor	Vertical	D1H	Descanso lado acoplamiento	Horizontal	D1A	Descanso lado acoplamiento	Axial	D1V	Descanso lado acoplamiento	Vertical	D2H	Descanso lado libre	Horizontal	D2A	Descanso lado libre	Axial	D2V	Descanso lado libre	Vertical
MEDICIONES																																																						
Punto	Ubicación	Dirección																																																				
M1H	Lado libre motor	Horizontal																																																				
M1A	Lado libre motor	Axial																																																				
M1V	Lado libre motor	Vertical																																																				
M2H	Lado acoplamiento motor	Horizontal																																																				
M2A	Lado acoplamiento motor	Axial																																																				
M2V	Lado acoplamiento motor	Vertical																																																				
D1H	Descanso lado acoplamiento	Horizontal																																																				
D1A	Descanso lado acoplamiento	Axial																																																				
D1V	Descanso lado acoplamiento	Vertical																																																				
D2H	Descanso lado libre	Horizontal																																																				
D2A	Descanso lado libre	Axial																																																				
D2V	Descanso lado libre	Vertical																																																				
Resultado medición en el descanso lado libre eje mm/s - RMS																																																						
M1H	M1A	M1V	M2H	M2A	M2V	D1H	D1A	D1V	D2H	D2A	D2V																																											
2,39	1,54	1,26	2,62	1,59	2,16	2	0,93	1,86	2,54	0,88	2,48																																											
DIAGNÓSTICO	OBSERVACIONES	RECOMENDACIONES																																																				
Según la norma ISO 2372 el equipo se encuentra en la categoría C de severidad, lo cual indica que el componente presenta un estado insatisfactorio de funcionamiento.	El daño en el rodamiento fue detectado en su etapa inicial, lo cual permite al equipo de mantenimiento tomar los resguardos pertinentes del caso.	Se debe continuar con el monitoreo del rodamiento D2, además de los otros rodamientos ya que la aparición de falla en el rodamiento analizado puede empezar a generar daños a los demás componentes del equipo.																																																				
DATOS DEL PERSONAL																																																						
SUPERVISOR																																																						
ANALISTA																																																						

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

Una vez realizado el análisis del rodamiento con las distintas técnicas, se elabora un informe donde se detalla la información del equipo puntos de medición y valores de estos, norma utilizada, y da un diagnóstico del componente analizado, observaciones y recomendaciones.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 ANÁLISIS ESPECTRAL DE LAS MEDICIONES

Una vez realizado todas las mediciones, se puede analizar los datos obtenidos, para esto se realizará el estudio de los gráficos de tendencia para cada punto.

Los gráficos obtenidos de las tendencias de velocidad pertenecientes a los rodamientos del motor presentan una tendencia estable dentro del tiempo en el cual se realizaron las mediciones. En los gráficos 4.1 y 4.2 se muestra la tendencia de velocidad del rodamiento lado libre del motor y lado acoplamiento del motor respectivamente en la dirección horizontal, en estos gráficos se observa que no existe daño en el rodamiento debido a que los valores de amplitud no sobrepasan la primera línea horizontal de alarma, pues, no se observa un comportamiento anómalo que se pudiese representar en una amplitud por sobre la primera alarma.

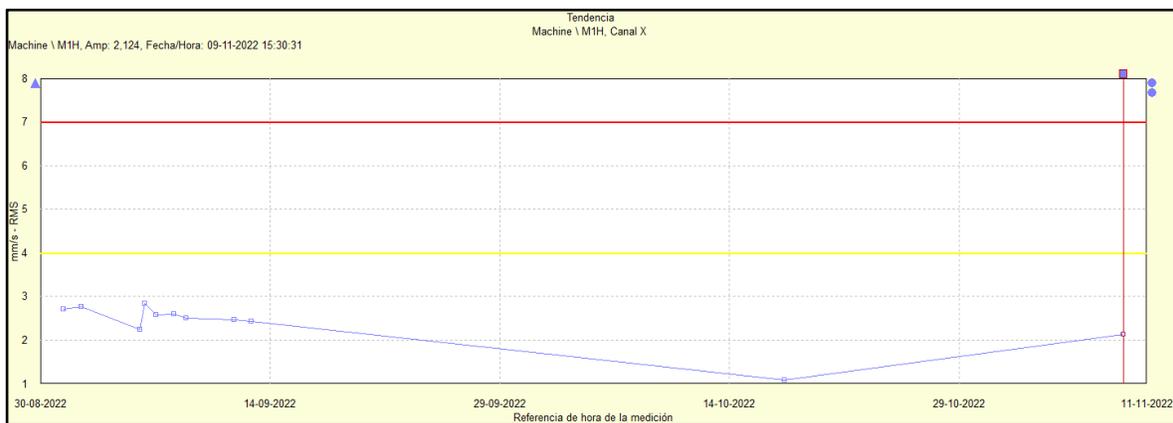


Gráfico 4.1: Espectro de tendencias en velocidad del rodamiento lado libre motor (M1H).

Fuente: elaboración propia

Capítulo 4. Análisis de resultados

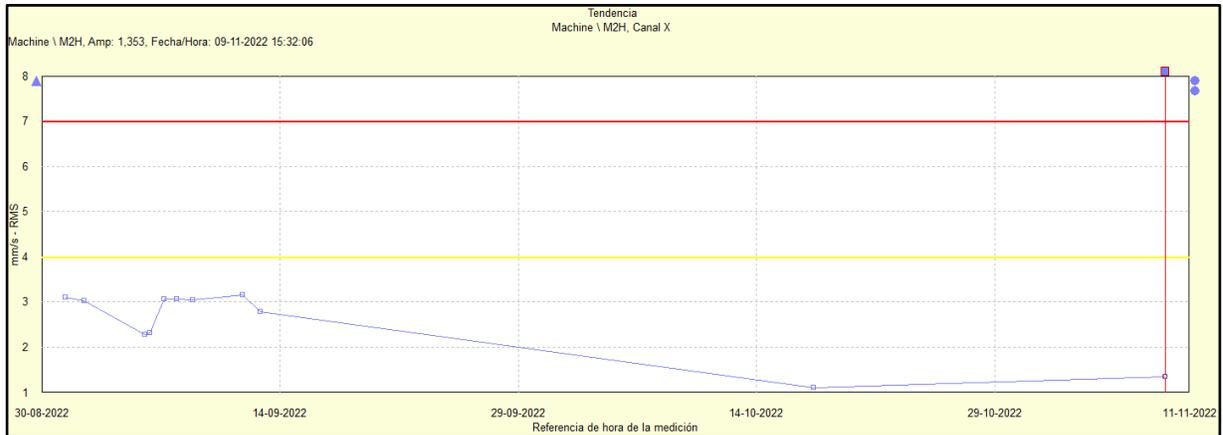


Gráfico 4.2: Espectro de tendencias en velocidad del rodamiento lado acoplamiento motor (M2H). Fuente: elaboración propia

En los gráficos 4.3 y 4.4 correspondiente a los descansos del eje lado acoplamiento y lado libre respectivamente, no se observa que exista alguna de las mediciones que sobre salga del comportamiento estable de las vibraciones medidas en las distintas fechas-

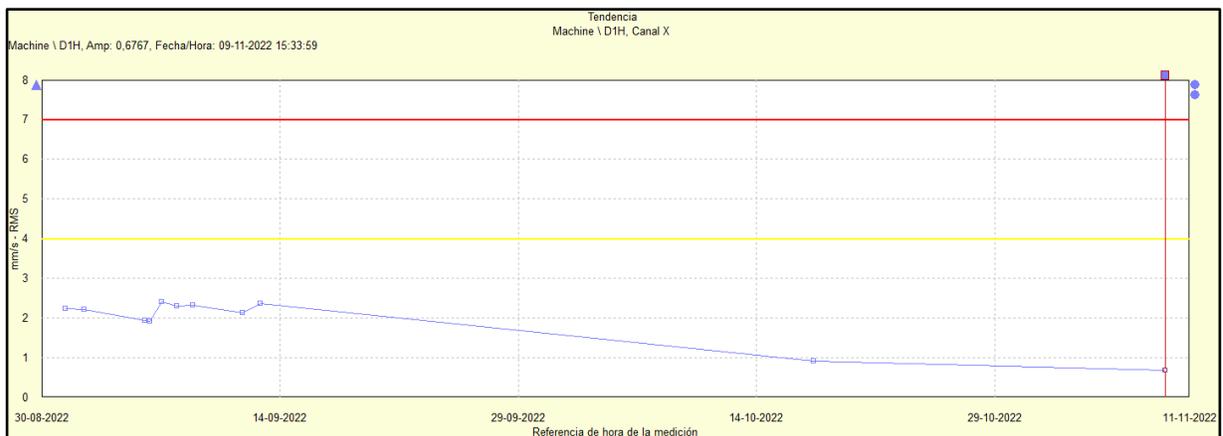


Gráfico 4.3: Espectro de tendencias en velocidad del descanso lado acoplamiento motor (D1H). Fuente: elaboración propia

Capítulo 4. Análisis de resultados

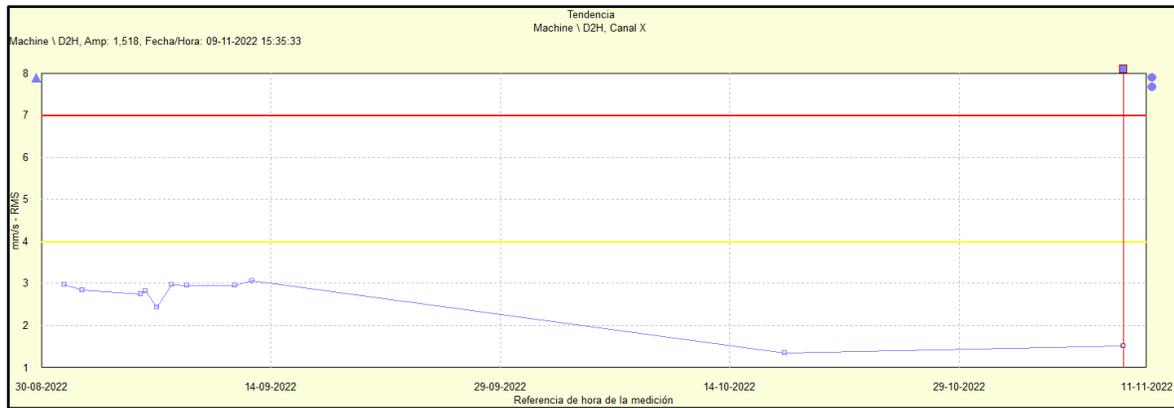


Gráfico 4.4: Espectro de tendencias en velocidad del descanso lado libre (D2H). Fuente: elaboración propia

Ya analizado el estado de los 4 rodamientos, se desmontó el rodamiento ubicado en el descanso lado libre del eje (D2), para realizar el daño en uno de sus elementos rodantes, realizado el daño se volvió a montar y volver a tomar las mediciones de velocidad, aceleración y envolvente.

En la tabla 4.1 se muestra en detalle las frecuencias y las amplitudes del espectro de aceleración g-RMS del rodamiento antes y después de la falla, además las frecuencias obtenidas empíricamente mediante la ecuación BSF, de esta tabla se puede observar que el rodamiento sin falla presenta una amplitudes muy pequeñas, lo que significa que el rodamiento no tiene falla en sus elementos rodantes, además las frecuencias a las cuales se producen los armónicos están más alejados en comparación con las frecuencias del rodamiento con falla.

Al observar la columna de las frecuencias del rodamiento con fallas, estas frecuencias se acercan en valor a las frecuencias obtenidas directamente con la formula BSF.

Las amplitudes correspondientes a cada armónico aumentaron significativamente su valor en comparación del rodamiento antes de la falla.

Las frecuencias para detectar fallos en los rodamientos tienen imprecisión ya que la carga axial y el deslizamiento propio de los componentes del equipo afectan en los valores obtenidos.

Tabla 4.1: Amplitudes y frecuencias del rodamiento antes y después de la falla

Descripción	Frecuencia rodamiento antes de la falla (CPM)	Amplitud rodamiento antes de la falla (g-RMS)	Frecuencia rodamiento con falla (CPM)	Amplitud rodamiento con fallas (g-RMS)	Frecuencias obtenidas de fórmula (CPM)
BSF D2	6931	0,000026	6369	0,0065	4842,31
	11863	0,000020	10738	0,00363	9684,62
	16794	0,000020	15106	0,0094	14526,93
	21725	0,001620	19475	0,0046	19369,24

En el gráfico 4.5 se muestra la tendencia en el espectro de aceleración obtenido del rodamiento D2 a través del tiempo, en el último punto se puede observar que la amplitud de la aceleración tuvo un incremento considerable siendo este de 0,466 g, llegando muy cerca de la primera alarma, la tendencia al tener un incremento, indica la aparición de una falla incipiente

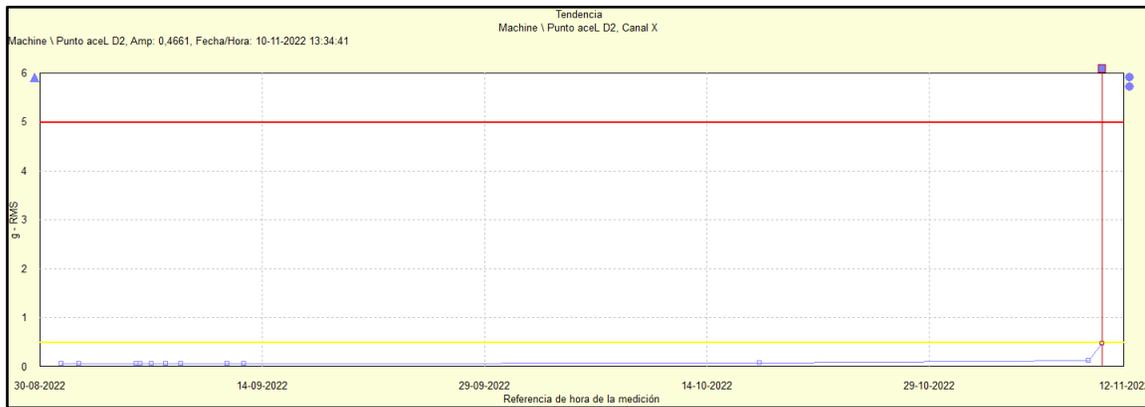


Gráfico 4.5: Aparición de falla incipiente en el descanso D2. Fuente: Elaboración propia

Los valores de aceleración presentados en el gráfico 4.5 se detallan en la tabla 4.2 para cada punto de medición.

Tabla 4.2: Amplitudes globales en aceleración g – RMS del rodamiento D2. Fuente:

Elaboración propia.

P	Fecha/Hora	Global
1	10-11-2022 13:34:41	0,466 g
2	09-11-2022 15:35:54	0,117 g
3	18-10-2022 11:45:20	0,073 g
4	13-09-2022 16:11:43	0,057 g
5	12-09-2022 13:57:18	0,056 g
6	09-09-2022 10:51:12	0,052 g
7	08-09-2022 10:06:27	0,054 g
8	07-09-2022 11:17:20	0,050 g
9	06-09-2022 17:28:16	0,048 g
10	06-09-2022 10:10:40	0,049 g
11	02-09-2022 13:27:13	0,056 g
12	01-09-2022 9:39:48	0,055 g

En la tabla 4.2 se observa que el punto de medición realizado el día 10-11-2022 presenta un considerable aumento de aceleración, este incremento se debe a que en esa medición el rodamiento ya había sido dañado, de esta manera se comienzan a presentar los primeros síntomas de daño incipiente.

4.2 ANÁLISIS DE LA TÉCNICA DE LA ENVOLVENTE Y FACTOR CRESTA

4.2.1 Técnica de la envolvente

El utilizar el análisis de vibraciones mediante la técnica de la envolvente permite detectar las fallas en sus inicios y no cuando ya se presentan síntomas más notorios como lo son vibraciones generales del equipo o aumento de temperatura de este.

Es posible detectar en los rodamientos, la presencia de defectos cuando se encuentran en etapa incipiente, haciendo uso del análisis de vibraciones y de las técnicas de demodulación y/o peakvue, las cuales enfocan su análisis sobre la zona de las altas frecuencias. En el análisis de vibraciones de rodamientos que giran a baja velocidad, las técnicas de demodulación y peakvue resultan ser más útiles en la detección incipiente de fallas, que el análisis espectral normal.

4.2.2 Factor cresta

Para poder obtener el factor cresta se utilizó el valor pico de las mediciones y el valor RCM, aunque el valor pico puede cambiar según la cantidad de mediciones que se realicen el factor cresta puede mostrar valores mayores o menores, con esto se puede concluir que el factor cresta por sí solo al momento de realizar un análisis vibratorio no es confiable.

CONCLUSIONES

La finalidad principal de esta memoria era poder detectar el momento en que se genera la falla en el rodamiento de los descansos del equipo de simulación de fallas Machine Fault Simulator, además de realizar el análisis espectral del mismo rodamiento.

Con el trabajo realizado se puede concluir que se lograron los objetivos específicos planteados al inicio de esta memoria.

En primera instancia, se desarrolló un estudio acabado del funcionamiento del equipo de simulación Machine Fault Simulator, respaldado principalmente en revisiones bibliográficas, horas de trabajo en laboratorio, además del apoyo académico proporcionado por los docentes.

Con el análisis espectral de un rodamiento en perfecto estado, basado en la respuesta vibratoria obtenida de la medición de cada punto del equipo donde se encuentran los elementos rodantes, se permitió establecer en primera instancia que el equipo no presentaba síntomas de falla. La realización de estas mediciones en todos los puntos, corresponde al protocolo de mediciones realizadas por el área de mantenimiento de cualquier industria.

El tercer objetivo específico consistía en realizar el análisis de la respuesta vibratoria del rodamiento con daño en uno de sus elementos rodantes, tras realizar un pequeño defecto que generó la aparición de una falla incipiente en él, el análisis de vibraciones realizado permitió detectar prematuramente la aparición del fallo, lo cual cobra relevancia cuando un analista puede detectar daños antes que estos representen una amenaza que ponga en riesgo la integridad del equipo y del personal encargado.

El generar una falla en la capa superficial del elemento rodante permitió distinguir las frecuencias características que presenta un rodamiento con fallas en sus elementos rodantes, además de realizar la comparación del espectro antes de la falla y después de la falla se apreció un notable aumento de las amplitudes tanto en aceleración y en velocidad.

La técnica de la envolvente permite poder diferenciar las frecuencias y amplitudes provenientes del defecto del elemento rodante de otras frecuencias del equipo, el factor cresta determina en

Conclusiones

qué etapa de desarrollo se encuentra la falla debido a que el aumento de este valor a través del tiempo indica que se está desarrollando la falla en el componente.

El análisis y clasificación del equipo mediante la norma ISO 2372 permitió establecer la condición operativa del componente mediante la tabla de severidad, al estar buscando la aparición de la falla incipiente en el rodamiento no se pudo establecer 2 clasificaciones para la severidad del equipo, una antes de la aparición de la falla y otra tras la aparición de la falla, ya que se buscaba como objetivo la detección de la aparición de la falla y no su desarrollo, con lo cual la condición mecánica del rodamiento fue considerada hasta la aparición de la falla, generándose solo una clasificación.

La manera más eficiente de detectar una falla en un rodamiento es comparando las amplitudes de las vibraciones tomadas, un correcto funcionamiento de un equipo que no tiene daño en sus elementos rodantes presenta sus valores globales dentro una línea constante sin variaciones, si dentro del espectro se detecta que un punto de medición ha aumentado con respecto a las demás mediciones se puede inferir en la aparición de una falla dentro del componente

Como insumo de esta memoria se desarrolló un informe tipo, el cual cuenta con el diagnóstico realizado al equipo, donde se especifican datos operativos, puntos de medición, valores de vibración, condición operativa y recomendaciones a seguir para el funcionamiento seguro del equipo. Dicho ejemplar es plan de acción

El monitoreo de condiciones permite programar el mantenimiento del equipo con el suficiente tiempo, por el contrario, el no realizar análisis vibratorio en rodamiento puede significar no detectar la aparición de una falla, la cual solo será visible cuando se produzca una falla catastrófica del propio componente o generar daños en el equipo. Además de poder detectar a tiempo la aparición de una falla en un rodamiento, se puede analizar la causa raíz que produjo la falla.

El daño en un rodamiento genera un aumento en las vibraciones del equipo, las cuales solo son perceptibles con la instrumentación adecuada, por ello, es necesario realizar un monitoreo y

Conclusiones

análisis constante, con la utilización de todas las técnicas que se utilizaron en el desarrollo de esta memoria.

REFERENCIAS

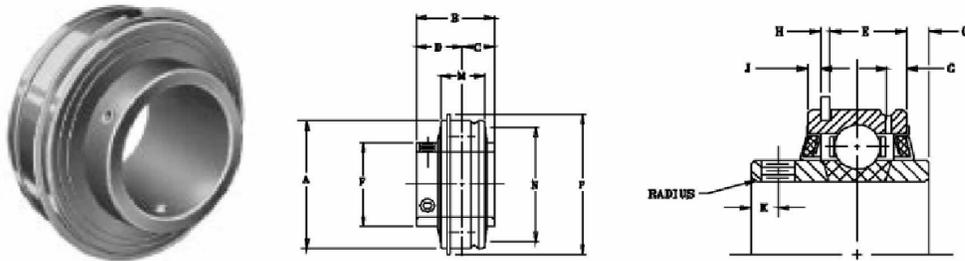
- [//www.directindustry.es/](http://www.directindustry.es/). (1 de Octubre de 2022). Obtenido de <https://www.directindustry.es/prod/cross-morse/product-20096-1947763.html>
- Barahona, R. (Agosto de 2017). Guía de configuración de puntos Off Line. Chile.
- Companiononi, F. (2016). Análisis modal operacional en estructuras mediante el empleo de acelerómetros. Cuba.
- Daza, G. (2007). *Apuntes del curso de vibraciones mecánicas*. Concepción, Chile.
- Flores, E., Andres, A., Erwin, L., & Jorge, R. (3 de Abril de 2020). Evaluación mediante vibraciones de los rodamientos de la transmisión de un prototipo mini Baja SAE. *Revista INGENIERÍA UC*, págs. 41-53.
- Fuentes, F. (Enero de 2020). *Vibraciones mecánicas*. Curico, Chile.
- Hall, A., Holowenko, A., & Laughlin, H. (1971). *Diseño de máquinas*. McGraw-Hill.
- <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu>. (junio de 2022). Obtenido de h: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/shm2.html>
- ISO. (1995). *Vibración mecánica. Evaluación de la vibración en una máquina mediante medidas en partes no rotativas*.
- Lavanderos, O. (Marzo de 2013). Análisis de órbitas como técnica de diagnóstico de fallas en equipos rotatorios. Concepción, Chile.
- Perez, F. (2021). *Conceptos generales en la gestión del mantenimiento industrial*. Buracamanga.
- Quest, S. (2015). *User Operating Manual for Machinery Fault simulator*. EE.UU.
- Quiroga, Trujillo, & Quintero. (2012). Estudio de fallas incipientes en rodamientos usando la técnica de la envolvente y cepstrum. *Revista chilena de ingeniería*, 350-359.
- Rao, S. (2012). *Vibraciones mecánicas*. Pearson educación.
- Rexnord. (31 de Octubre de 2022). <https://www.rexnord.com/>. Obtenido de <https://www.rexnord.com/products/bearings/ball-bearings/unmounted-replacement-bearings/er-k/er12k>
- Reyes, N., & Galleguillos, C. (2014). Estudio y análisis dinámico de señales provenientes de cajas de engranajes.
- Rodríguez, A. (s.f.). Caracterización de los componentes de las firmas de vibración de los sistemas rotativos que componen la sección del molino 1 de la empresa papeles

Referencias

- nacionales S.A. *CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPONENTES DE LAS FIRMAS DE*. Pereira, Colombia.
- Saavedra, P. (s.f.). *Tutorial severidad vibratoria. Parte 1*. Concepción, Chile.
- Saavedra, P. (Abril de 2009). Curso Análisis de vibraciones de máquinas rotatorias nivel I. Concepcion, Chile.
- Sánchez, J. (2014). Diagnóstico de fallas incipientes mediante la variación angular instantánea. Santiago, Chile.
- SKF. (2017). Daño de rodamientos y análisis de falla.
- SKF. (2019). *Rodamientos*.
- SKF. (2019). SKF @ptitude Analyst y SKF Multilog On-line Systems. USA.

ANEXOS

ANEXO 1: ESPECIFICACIONES RODAMIENTO



ER Series Style "A" Extended Inner Ring Bearing Assemblies...Setscrew Locking

SHAFT DIAM.		BRG. NO.	Dimensions in Inches														UNIT WT.	
			A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	M	N	RAD	O		P
1/2		ER-8																
9/16		ER-9																
5/8		ER-10	47MM															
11/16		ER-11	1.8504	1 7/32	13/32	13/16	31/64	1 3/16	11/64	3/64	3/32	3/16	5/8	1 5/8	.040	.094	2 1/16	.56
3/4		ER-12																
	20	ER-204																

Anexos

ANEXO 2: FICHA TÉCNICA ACELERÓMETRO

Salida del sensor	Vibracion dinamica (IEPE)
Sensibilidad	100 mV/g
Tolerancia	±10 %
Frecuencia de respuesta	0.7 Hz – 10,000 Hz
Perno de montaje	1/4-28
Conector	Conector militar 2 pines (MIL-C-5015)
Orientación del conector	Lateral
Rango de escala completa	80 g peak
Frecuencia de resonancia	22 kHz
Rango de temperatura	-50°C to +120°C
Peso	145 gramos
Aprobaciones de áreas peligrosas	No