

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