



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

CARRERA DE MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

**“ANÁLISIS DE MODOS Y EFECTOS DE FALLA EN RODAMIENTOS
POR DEFECTOS DE LUBRICACIÓN A TRAVÉS DE ULTRASONIDO
EN UN SIMULADOR ELECTRONEUMÁTICO”**

Trabajo de titulación:

Tipo: Proyecto de Investigación

Previa a la obtención del título de:

INGENIERO DE MANTENIMIENTO

AUTORES: CÉSAR AURELIO AUSAY BAQUERO

WILLAM ENRIQUE ESTRADA TUALOMBO

DIRECTOR: Ing. SEGUNDO EDUARDO HERNÁNDEZ DÁVILA

Riobamba – Ecuador

2020

© 2020, César Aurelio Ausay Baquero; & Willam Enrique Estrada Tualombo

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

Nosotros, César Aurelio Ausay Baquero Y Willam Enrique Estrada Tualombo, declaramos que el presente trabajo de titulación es de nuestra autoría y que los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

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

Riobamba, 10 de marzo del 2020



César Aurelio Ausay Baquero
060228231-1



Willam Enrique Estrada Tualombo
060229804-4

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA DE MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

El Tribunal del trabajo de integración curricular certifica que: El trabajo de integración curricular: Tipo: Proyecto de Investigación, **ANÁLISIS DE MODOS Y EFECTOS DE FALLA EN RODAMIENTOS POR DEFECTOS DE LUBRICACIÓN A TRAVÉS DE ULTRASONIDO EN UN SIMULADOR ELECTRONEUMÁTICO**, realizado por los señores: **CÉSAR AURELIO AUSAY BAQUERO** y **WILLAM ENRIQUE ESTRADA TUALOMBO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Msc. Marcelo Antonio Jácome Valdez PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	 _____	10/03/2020
Ing. Eduardo Segundo Hernández Dávila DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	 _____	10/03/2020
Ing. José Antonio Granizo Ph.D MIEMBRO DE TRIBUNAL	 _____	10/03/2020

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis respetados padres que desde niño han sabido inculcarme la importancia de estudiar y superarse para perfilar un futuro exitoso y lleno de esperanza. A mis hijos por ser la inspiración y la motivación fundamental para llegar a alcanzar este objetivo. A mí querida familia que en los momentos más duros de mi vida supieron darme el apoyo y la fortaleza para salir adelante y culminar mi carrera profesional

César

A Sara, mi esposa por su amor e incansable apoyo y comprensión

Willam

AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento sincero a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a la Escuela de Ingeniería de Mantenimiento y su personal docente, por compartir sus conocimientos y brindarme la oportunidad de obtener una profesión digna para servir a la sociedad y mi país

César

A la Carrera de Mantenimiento Industrial y a sus docentes, por construir un camino de vida, a mis hijos Andrea, William y Kemil por darme la fuerza necesaria para seguir, a mi madre por la fe que siempre me dio y a Dios por ser el pilar fundamental de todo.

Willam

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xiv
ÍNDICE DE ANEXOS	xv
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	
1. MARCO TEÓRICO	4
1.1. Generalidades de los rodamientos.....	4
<i>1.1.1. Rodamientos</i>	<i>4</i>
<i>1.1.1.1. Anillos</i>	<i>4</i>
<i>1.1.1.2. Elementos rodantes</i>	<i>4</i>
<i>1.1.1.3. Jaula.....</i>	<i>4</i>
<i>1.1.1.4. Sellos.....</i>	<i>4</i>
<i>1.1.2. Clasificación de los rodamientos</i>	<i>5</i>
<i>1.1.3. Selección de rodamientos</i>	<i>5</i>
<i>1.1.4. Selección del tamaño del rodamiento</i>	<i>5</i>
<i>1.1.5. Vida útil del rodamiento</i>	<i>6</i>
<i>1.1.5.1. Parámetros para el cálculo de la vida útil.....</i>	<i>6</i>
1.2. Fallas en los rodamientos.....	6
<i>1.2.1. Principales fallas y modos de falla en rodamientos</i>	<i>7</i>
<i>1.2.1.1. Marcas o rayas oblicuas sobre la pista interna, externa o elementos rodantes</i>	<i>7</i>
<i>1.2.1.2. Micro corrosión de la pista externa.....</i>	<i>7</i>
<i>1.2.1.3. Pista interna deteriorada</i>	<i>7</i>

1.2.1.4.	<i>Marcas o rayas de pequeña magnitud</i>	7
1.2.1.5.	<i>Deterioro puntual de la zona de trabajo de la pista externa</i>	7
1.2.1.6.	<i>Rotura de jaula o rejilla</i>	7
1.2.2.	<i>Principales fallas y modos de falla en rodamientos por lubricación</i>	8
1.2.2.1.	<i>Decoloración</i>	8
1.2.2.2.	<i>Rayado y descascarillado</i>	8
1.2.2.3.	<i>Calor excesivo en el extremo del rodillo</i>	8
1.2.2.4.	<i>Bloqueo total del rodamiento</i>	8
1.3.	<i>Lubricación de rodamientos</i>	9
1.3.1.	<i>Introducción</i>	9
1.3.2.	<i>Selección del lubricante para rodamientos</i>	9
1.3.3.	<i>Lubricación con grasa</i>	9
1.3.3.1.	<i>Selección de la cantidad de grasa de los rodamientos</i>	10
1.3.3.2.	<i>Selección del tipo de grasas lubricante</i>	11
1.3.3.3.	<i>Condición de lubricación: la relación de viscosidad k</i>	12
1.3.4.	<i>Lubricación con aceite</i>	13
1.4.	<i>Análisis por ultrasonido de rodamientos</i>	14
1.4.1.	<i>Introducción</i>	14
1.4.2.	<i>Sonido y Ultrasonido</i>	14
1.4.3.	<i>Análisis por ultrasonido</i>	16
1.4.4.	<i>Detección de fallas en rodamientos</i>	16
1.4.4.1.	<i>Fallas por lubricación</i>	17
1.4.4.2.	<i>Falla por exceso de lubricación</i>	17
1.5.	<i>Análisis por vibración en rodamientos</i>	17
1.5.1.	<i>Análisis de vibraciones en el diagnóstico de falla en rodamientos</i>	17
1.5.1.1.	<i>Evolución de falla por picadura</i>	18
1.5.1.2.	<i>Normativa para el control</i>	19

1.6.	Contrastes de normalidad.....	20
1.6.1.	Pruebas paramétricas.....	20
1.6.1.1.	Contraste de Shapiro-Wilk.....	20
1.6.2.	Pruebas no paramétricas.....	21
1.6.2.1.	Prueba de Wilcoxon Man Whytney.....	21
1.6.3.	Distribución de Weibull.....	21
1.6.4.	Prueba de Kolmogorov-Smirnov.....	21
1.7.	Normativas de seguridad.....	22
1.7.1.	OHSAS 18001.....	22
1.8.	Equipos de protección personal.....	23
1.8.1.	Protección de los oídos.....	24
1.8.1.1.	Niveles permisibles de ruido continuo.....	25
1.8.1.2.	Niveles permisibles de ruido de impacto.....	25
CAPÍTULO II		
2.	MARCO METODOLÓGICO.....	27
2.1.	Diseño del banco de pruebas.....	27
2.2.	Sistemas del banco de pruebas.....	27
2.2.1.	Sistema de potencia.....	27
2.2.2.	Sistema de transmisión.....	28
2.2.2.1.	Selección del eje.....	28
2.2.2.2.	Selección del acople.....	29
2.2.2.3.	Selección de las chumaceras.....	30
2.2.3.	Sistema de pruebas.....	31
2.2.3.1.	Selección del rodamiento.....	31
2.2.3.2.	Cálculo del llenado de grasa inicial del rodamiento.....	32
2.2.3.3.	Construcción del cubo de pruebas de rodamientos.....	32
2.2.4.	Sistema hidráulico.....	33

2.2.4.1.	<i>Selección del lubricante</i>	34
2.2.5.	<i>Sistema eléctrico</i>	35
2.3.	Diseño y montaje de la estructura del banco de pruebas.....	37
2.3.1.	<i>Bosquejo inicial</i>	37
2.3.2.	<i>Diseño final.....</i>	38
2.3.3.	<i>Montaje de los sistemas en la estructura</i>	39
CAPÍTULO III		
3.	MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	43
3.1.	Procedimiento para la medición y toma de datos.....	43
3.1.1.	<i>Equipo de ultrasonido ULTRAPROBE 15000</i>	43
3.1.2.	<i>Equipo de vibraciones VIBRACHECK 200.....</i>	44
3.1.2.1.	<i>Principales características del equipo</i>	44
3.1.3.	<i>Localización del punto de prueba</i>	45
3.1.4.	<i>Cálculo de frecuencia de fallas generadas por el rodamiento de prueba 6206....</i>	45
3.1.5.	<i>Toma de mediciones en condiciones normales.....</i>	46
3.1.6.	<i>Mediciones en condiciones normales de funcionamiento con el equipo de ultrasonido</i>	47
3.1.7.	<i>Cálculo de la carga equivalente para condiciones de lubricación diferentes</i>	48
3.1.8.	<i>Preparación de los elementos para las mediciones en condiciones anormales....</i>	49
3.1.9.	<i>Cambio de condiciones normales.....</i>	49
3.1.10.	<i>Limpieza del rodamiento para pruebas.....</i>	50
3.1.11.	<i>Condiciones de lubricación defectuosa.....</i>	50
3.1.12.	<i>Toma de datos y monitoreo de rodamientos hasta la falla.</i>	51
3.1.12.1.	<i>Monitoreo de rodamientos con escasa lubricación.....</i>	51
3.1.12.2.	<i>Monitoreo de rodamientos en condiciones normales</i>	51
3.1.12.3.	<i>Monitoreo de rodamientos en condiciones de exceso de lubricante</i>	51
3.1.13.	<i>Caracterización de la falla incipiente</i>	51
3.2.	Resultados y Análisis.....	56

CONCLUSIONES.....	61
RECOMENDACIONES.....	63
GLOSARIO	64
BIBLIOGRAFÍA.....	66
ANEXOS	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Principales fallas y modos de falla de los rodamientos	8
Tabla 2-1: Grados NLGI de grasas para rodamientos.....	10
Tabla 3-1: Relación de velocidad para la selección de la cantidad de lubricante	11
Tabla 4-1: Modos de falla en rodamiento según los decibles medidos.....	17
Tabla 5-1: Norma ISO 10816- 1995. Severidad de Vibración.....	20
Tabla 1-2: Datos técnicos del motor	27
Tabla 2-2: Datos técnicos del motor	28
Tabla 3-2: Propiedades del acero SAE 705	29
Tabla 4-2: Características del acople elástico Love Jaw L110	30
Tabla 5-2: Características de la chumacera UCP 208.....	30
Tabla 6-2: Dimensiones del rodamiento 6206	32
Tabla 7-2: Partes de la bomba hidráulica de mano	34
Tabla 8-2: Características del lubricante seleccionado	35
Tabla 1-3: Frecuencias de fallos de rodamientos.....	45
Tabla 2-3: Armónicos de la frecuencia de fallos en rodamiento en Hercios.....	46
Tabla 3-3: Armónicos de la frecuencia de fallos en rodamiento en Ciclos por minuto.....	46
Tabla 4-3: Valores de la frecuencia de fallo en condiciones normales de funcionamiento.....	47
Tabla 5-3: Tiempo de vida de los rodamientos.....	53
Tabla 6-3: Estadística de los tiempos de falla.....	56
Tabla 7-3: Evaluación de normalidad con la prueba Shapiro-Wilk.....	58
Tabla 8-3: Comparación de variables con la prueba de Wilcoxon Mann Whytney.....	58
Tabla 9-3: Parámetros de Weibull de los tiempos de vida.....	60
Tabla 10-3: Prueba de Kolmogorov-Smirnov.....	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Elementos de un rodamiento.....	5
Figura 2-1: Principales fallas en máquinas rotativas	6
Figura 3-1: Escala Comparativa del Nivel de Presión Sonora.....	16
Figura 4-1: Generación de impactos por la presencia de defectos.....	18
Figura 1-2: Acople elástico L110	30
Figura 2-1: Dimensiones y geometría de la chumacera UCP 208	31
Figura 3-2: Rodamientos utilizados en las pruebas	31
Figura 4-2: Dimensiones y geometría del rodamiento 6206.....	32
Figura 5-2: Porta rodamientos	33
Figura 6-2: Bomba hidráulica manual	33
Figura 7-2: Válvula hidráulica de alta presión.....	34
Figura 8-2: Manómetro.....	34
Figura 9-2: Variador de frecuencias	36
Figura 10-2: Relé térmico bimetálico	36
Figura 11-2: Tablero eléctrico	37
Figura 12-2: Bosquejo inicial	38
Figura 13-2: Banco de Pruebas.....	38
Figura 14-2: Tablero eléctrico	39
Figura 15-2: Chumaceras.....	39
Figura 16-2: Eje y acople elástico.....	39
Figura17-2: Montaje final.....	40
Figura 18-2: Alineación del motor y chumaceras.....	40
Figura 19-2: Shim para alineación.....	41
Figura 20-2: Relojes comparadores	41
Figura 1-3: Equipo de ultrasonido ULTRAPROBE 1500	43

Figura 2-3: Accesorios del equipo ULTRAPROBE 15000	44
Figura 3-3: Analizador de vibraciones Vibracheck 200	44
Figura 4-3: Caja porta rodamiento.....	45
Figura 5-3: Espectro de medición base.....	46
Figura 6-3: Medición tomada con el equipo de ultrasonido	47
Figura 7-3: Peso del lubricante	50
Figura 8-3: Limpieza del rodamiento	50
Figura 9-3: Condiciones de lubricación defectuosa.....	51
Figura 10-3: Medidor de vibraciones TPI 9070.....	52
Figura 11-3: Pantalla del medidor de vibraciones TPI 9070	53
Figura 13-3: TPI 9070	53
Figura 14-3: Colocación en el punto de medición	54
Figura 15-3: Valores normales de BDU	54
Figura 16-3: Valores de falla de BDU	55

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-1: Diagrama para obtener el valor v	12
Gráfico 2-1: Diagrama para obtener v_1	13
Gráfico 3-1: Tabla para determinar el tipo de lubricante	14
Gráfico 1-2: Gráfica selección del lubricante	35
Gráfica 1-3: Medición tomada en condiciones de falla del rodamiento.	55
Gráfica 2-3: Medición tomada en condiciones de falla del rodamiento.	56
Gráfica 3-3: Histograma de los tiempos de vida con escasez de grasa.....	57
Gráfica 4-3: Histograma de los tiempos de vida con cantidad normal de grasa	57
Gráfica 5-3: Histograma de los tiempos de vida con exceso de grasa.....	58
Gráfica 6-3:: Comparación de las variables mediante diagrama de cajas	59

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A. CATÁLOGO SKF

ANEXO B. DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS

ANEXO C. PLANO DE MÓDULO DE ENSAYOS

ANEXO D. MONITOREO CON ESCASA LUBRICACIÓN

ANEXO E. MONITOREO EN CONDICIONES NORMALES

ANEXO F. MONITOREO CON EXCESO DE LUBRICANTE

ANEXO G. PROGRAMACIÓN PARA LOS CÁLCULOS ESTADÍSTICOS EN R STUDIO

ANEXO H: DAÑOS EN LOS RODAMIENTOS

ANEXO I: FOTO TERMOGRÁFICA DEL RODAMIENTO DURANTE EL ENSAYO

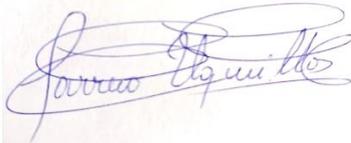
ANEXO J: GUÍA DE LABORATORIO

ANEXO K: MANUAL DE OPERACIÓN

RESUMEN

El principal objetivo de este proyecto fue la construcción de un simulador de pruebas para el análisis de lubricación en rodamientos, el cual está compuesto de un sistema de potencia, transmisión, eléctrico, hidráulico y sistema de pruebas, cuya meta fue ayudar a caracterizar las fallas incipientes de los rodamientos basándose en los cálculos de la cantidad de grasa, tipo de grasa y carga a aplicarse. A continuación, se realizaron mediciones en condiciones normales a través del analizador de ultrasonido ULTRAPROBE 15000, el analizador de vibraciones VIBRACHECK 200 y el medidor de tendencia inteligente TPI 9080, determinándose la línea base para el ultrasonido que es menor a -47 dB y en vibraciones está entre 0 – 50 BDU, cuyos valores fueron la base para el monitoreo de las condiciones de los 15 rodamientos en condiciones normales, cantidad de grasa calculada, exceso de grasa y escasez de grasa; lográndose determinar las condiciones de falla que fueron para ultrasonido mayores a -25 dB y para vibraciones mayor a 100 BDU. Terminadas las mediciones en los 15 rodamientos se obtuvieron 15 valores que fueron evaluados mediante la prueba de normalidad paramétrica Shapiro Wilk resultando que dos de las tres condiciones no se comportan siguiendo la distribución normal, por lo cual, se aplicó la prueba de Wilcoxon Mann Whitney de tipo no paramétrico concluyendo que, los tiempos de falla cuando el rodamiento posee una escasez de grasa, exceso de grasa y condiciones normales de lubricación son diferentes. Para finalizar, se realizó un análisis estadístico del tiempo de vida útil de los rodamientos, tiempo en que los rodamientos entran en modo de falla incipiente, mediante la distribución de Weibull siendo sustentado este último cálculo mediante la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov que ratifica que los tiempos obtenidos de las mediciones se ajustan a la distribución de Weibull con una confiabilidad del 95%.

PALABRAS CLAVES: <TECNOLOGÍAS Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <FALLAS INCIPIENTES>, <VIDA ÚTIL>, <ULTRASONIDO>, <ANÁLISIS ESTADÍSTICO>.



13-07-2020

0124-DBRAI-UPT-2020

ABSTRACT.

The main aim of this project was the construction of a test simulator to facilitate data analysis of bearings lubrication conditions are made up of power, transmission, electrical, hydraulic and test system, the goal of which was to help characterize the failures of the incipient bearings based on calculations of the amount of grease, type of grease and load to be applied. Then Measurements were carried out under normal operating conditions by ULTRA PROBE 15000 ultrasound analyzer VIBRACHECK 200 vibration analysis and TPI 9080 smart trend meter determining the baseline for an ultrasound that is less than -47 dB and in vibrations. It is between 0 - 50 BDU. Whose values were the baseline for monitoring conditions of the bearings under normal conditions calculated amount of grease, excess grease, and shortage of grease managing to determine the failure conditions that were for ultrasound greater than -25 dB and vibrations greater than 100 BDU. After the measurements in the 15 bearings were obtained 15 values, they were evaluated using the Shapiro Wilk parametric normality test. It is resulting in two of the three conditions that do not behave according to the normal distribution. Therefore, the Wilcoxon Mann Whitney test of the non-parametric type so concluding that the failure times when the bearings have a shortage of grease, excess grease, and normal lubrication conditions are different. Finally, a statistical analysis of the bearing service life was carried out a period during which the bearings in an incipient failure mode were performed using the Weibull distribution. This last calculation is supported by the Kolmogorov-Smirnov goodness-of-fit test, which confirms that the times obtained from the measurements are adjusting to the Weibull distribution with 95% reliability.

KEYWORDS: <ENGINEERING TECHNOLOGIES AND SCIENCES>, <INCOMING FAILURES>, <USEFUL LIFE>, <ULTRASOUND>, <STATISTICAL ANALYSIS>.

INTRODUCCIÓN

Para indagar y relacionar un funcionamiento perfecto de los elementos rotodinámicos con un programa efectivo de mantenimiento utilizando ondas ultrasónicas de análisis, se ha construido un banco de prueba en el que se aprecia un sistema dinámico impulsado por un motor trifásico de 5 Hp, unido a través de un acople flexible a un eje apoyado en dos chumaceras UCP 208 que soportan al rodamiento de pruebas que esta acoplado a un mecanismo hidráulico que genera una presión radial controlada de hasta 5000 psi, el sistema está controlado por un variador de frecuencia LS HS5 que permite variar a distintas velocidades de prueba.

Las reacciones del sistema han sido monitoreadas y diagnosticadas a través de la técnica de ultrasonido apoyados de análisis de vibraciones, que han permitido captar espectros únicos de la evolución de modos de fallas y fallas catastróficas de forma progresiva desarrollando un conjunto de espectros patrón o línea base y espectros característicos de fallas por falta de lubricante, exceso de lubricante y lubricación recomendada por el fabricante.

Los resultados obtenidos en este trabajo investigativo han permitido perfeccionar e incrementar los conocimientos de la técnica de ultrasonido apoyado con una técnica de vibraciones para un efectivo diagnóstico del estado técnico de los rodamientos de un sistema productivo y programar el cambio de elementos de acuerdo a un plan maestro de mantenimiento o mantenimiento de oportunidad disminuyendo al mínimo la probabilidad de falla de la maquinaria, incrementando la confiabilidad, y con la confianza de que el componente, equipo o sistema que fue intervenido por mantenimiento ejerza sus funciones satisfactoriamente en un tiempo determinado, alcanzando la máxima disponibilidad.

Antecedentes

En la industria moderna, en toda maquinaria sea grande o pequeña, compleja o sencilla, la lubricación es la parte vital en el normal funcionamiento e incremento de la vida útil de los elementos rotodinámicos principalmente los rodamientos. Es evidente que en gran parte de los sistemas mecánicos la fricción y el desgaste son efectos negativos que como ingenieros de mantenimiento debemos controlar y evitar.

La fricción es “la pérdida de energía mecánica durante el inicio, desarrollo y final del movimiento relativo entre dos zonas materiales en contacto, como fricción externa entre cuerpos diferentes o

fricción interna entre partículas de un mismo cuerpo” (Montalvo, 2013, pp. 52). Entonces mediante este efecto se produce desgaste produciendo pérdida de material, por lo que cualquier técnica de reducción de este genera grandes beneficios. Por lo tanto, la fricción es una de las causas de disipación de energía por lo que su control se traduce en un importante ahorro energético.

La lubricación es el modo más efectivo de controlar la fricción y el desgaste, la función primordial es el de interponer una película lubricante entre dos superficies sólidas donde existe un movimiento relativo entre ellas. La correcta lubricación de los mecanismos permite que el pronóstico de vida útil sea mayor y que garantice permanentemente niveles aceptables de disponibilidad del equipo, reduciendo al máximo los costos de mantenimiento y lubricación. Por lo tanto, la naturaleza y porcentajes de los componentes de la grasa dependen mucho de las aplicaciones para las cuales va a estar destinada (Estíbaliz, 2016).

Es muy importante que el personal encargado de la lubricación esté capacitado en la manipulación, selección, método de aplicación, establecimiento de frecuencias y almacenamiento adecuado considerando las recomendaciones del fabricante y calculando la cantidad de lubricante tomando en cuenta los parámetros de diseño del mecanismo tales como cargas, velocidad, temperatura, medio ambiente en el cual trabaja el equipo. (Aguillen, 2003)

Dentro de un programa de mantenimiento preventivo la lubricación implica la selección del tipo específico de lubricante, la frecuencia de lubricación, la cantidad exacta de lubricante, la técnica de aplicación y la técnica de evaluación y análisis. (Trujillo, 2007, pp. 30)

Planteamiento del problema

Una de las principales causas por lo que un rodamiento falla es la inadecuada lubricación, según varios estudios realizados ubican los defectos por lubricación como la principal causa de deterioro de los rodamientos.

Donde el 60 por ciento de las causas de falla de los rodamientos están relacionados con la lubricación sea esta por grasa inadecuada o contaminación; Tomando en cuenta las consideraciones de estudios realizados sobre el tema y el problema expuesto se plantea la hipótesis siguiente.

Hipótesis: La vida útil de los rodamientos depende de la cantidad de lubricante.

Variable Independiente: cantidad de lubricante

Variable Dependiente: la vida útil del rodamiento.

Justificación

En Ecuador, la provincia de Chimborazo, en la ciudad de Riobamba, la totalidad de las empresas productivas advierten un prematuro deterioro de sus mecanismos dinámicos principalmente sus rodamientos que no alcanzan su pronóstico de vida útil de diseño. Estudios realizados ubican a los defectos por lubricación como la principal causa de la falla prematura de rodamientos, esto se debe a una incorrecta selección de la grasa lubricante, técnica inadecuada de lubricación, contaminación por mal almacenamiento, incorrecta frecuencia de re-lubricación, excesiva o poca cantidad de lubricante.

Como estudiantes de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Carrera de Mantenimiento Industrial con adecuado conocimiento tecnológico adquirido en el campo del mantenimiento basado en la condición, se direcciona la investigación en la aplicación del ultrasonido pasivo en la detección y diagnóstico de fallas incipientes en rodamientos por defectos de lubricación. Esta técnica no invasiva aplicada al mantenimiento preventivo de los rodamientos permitirá crear una nueva matriz base de valores considerados como normales o admitidos expresada en espectros ultrasónicos. A través de un estudio estadístico integral se obtendrá los valores recomendados para la cantidad de lubricante requerido y detección de fallas incipientes en rodamientos. Además, se estipulará los lineamientos para la elaboración de un plan de mantenimiento integral que permitirá alcanzar el 100% de confiabilidad de la maquinaria productiva, alta disponibilidad del sistema para cumplir la demanda de producción establecida con oportunidad, altos estándares de calidad y enmarcado en normas ambientales y del buen vivir.

Objetivos

Objetivo General

Analizar los modos y efectos de falla en rodamientos por defectos de lubricación a través de ultrasonido en un simulador de prueba.

Objetivos Específicos

- Construir un simulador de pruebas para el análisis de lubricación en rodamientos.
- Determinar las características de la falla incipiente de los rodamientos.
- Determinar la relación entre cantidad de lubricante y la vida útil del rodamiento.
- Establecer un análisis estadístico para la verificación de la hipótesis planteada, respecto de la vida útil de los rodamientos que dependen de la cantidad de lubricante.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Generalidades de los rodamientos

Dentro de los elementos de máquinas que se han diseñado para mejorar el rendimiento mecánico de los equipos se encuentran los rodamientos, estos elementos son utilizados en maquinaria donde sirven como punto de apoyo y soportan cargas en ejes rotativos entre dos componentes mecánicos.

1.1.1. *Rodamientos*

Los rodamientos son elementos de máquinas utilizados para transmitir movimiento y fuerza entre dos componentes mecánicos por medio de un eje, reduciendo la fricción entre dichos componentes y aumentando la confiabilidad de funcionamiento del equipo. Entre sus partes principales destacan: un anillo exterior e interior, elementos rodantes, jaula o separador y un retén o sello.

1.1.1.1. *Anillos.*

Los anillos (exterior e interior) están conformados por una pista donde giran los elementos rodantes soportando la carga aplicada al rodamiento, son fabricados de aceros al cromo-carbono (100-Cr6) con 1% de carbono y 1,5% de cromo, conforme a la normativa ISO 683-17:1999.

1.1.1.2. *Elementos rodantes*

Estos componentes suelen ser de bolas o de rodillos dependiendo de la aplicación, los cuales giran sobre las pistas formadas en los anillos permitiendo su movimiento con un rozamiento mínimo. Son fabricados generalmente del mismo material de las pistas.

1.1.1.3. *Jaula*

Este componente sirve para separar y mantener a distancias iguales entre sí a los elementos rodantes, como también sirve de guía.

1.1.1.4. *Sellos*

Estos componentes mantienen el lubricante al interior del rodamiento y evita que entre contaminantes externos. En la figura 1-1 se encuentran los elementos que constituyen un rodamiento.

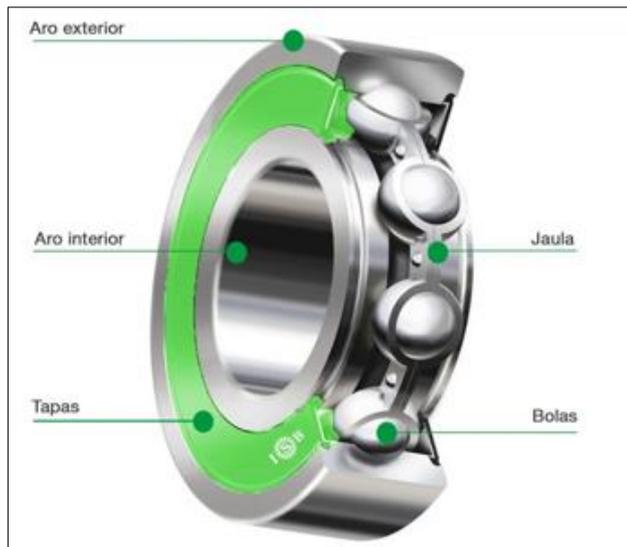


Figura 1-1: Elementos de un rodamiento
 Realizado por: <https://isbsport.com/partes-de-un-rodamiento/>

1.1.2. Clasificación de los rodamientos

Los rodamientos se clasifican atendiendo dos consideraciones:

- Según la carga aplicada: Rodamientos de carga radial, axial y mixta.
- Según la constitución de sus elementos rodantes: Rodamientos de bolas y cilíndricos

1.1.3. Selección de rodamientos

Para seleccionar un rodamiento se debe tener en cuenta aspectos como: el equipo o maquinaria donde serán utilizados, el diseño, las características y los elementos asociados al rodamiento (eje, lubricantes, velocidad, soportes etc.), pues cada una de estas decisiones de selección permitirá llegar a la eficiencia y fiabilidad que se necesita alcanzar.

En la selección de un rodamiento existen varios factores a tomar en cuenta para que la máquina o equipo donde sean utilizados llegue a cumplir satisfactoriamente la demanda requerida, entonces no existen reglas fijas en la selección de un tipo de rodamiento. Algunos de estos factores a considerar son la carga, espacio requerido, velocidad, temperatura y rigidez.

1.1.4. Selección del tamaño del rodamiento

El tamaño del rodamiento se elige fundamentalmente por la capacidad de carga en relación con las cargas que soportara en la aplicación, los requerimientos de la vida útil y del grado de seguridad de operación.

1.1.5. Vida útil del rodamiento

Para que un rodamiento llegue a cumplir su vida útil estimada se debe encontrar en condiciones óptimas de limpieza durante su montaje y su operación, tener una buena lubricación y operar en un ambiente adecuado. La vida útil se determina en base a la cantidad de revoluciones o el número de horas totales que soporta hasta que aparezca su primer síntoma de falla o daño por fatiga.

Dentro de las probabilidades de falla de un rodamiento existen factores como: el ajuste, lubricación, contaminación y fatiga.

1.1.5.1. Parámetros para el cálculo de la vida útil.

La vida útil de un rodamiento es calculada mediante la expresión matemática (1) que proviene de la norma ISO 281.

$$L_{10} = \left(\frac{C_r}{F_e}\right)^n \quad (1)$$

De donde:

- L_{10} = vida nominal básica (con una confiabilidad del 90%) [millones de revoluciones]
- C_r = capacidad de carga dinámica básica [N]
- F_e = carga dinámica equivalente del rodamiento [N]
- $n = 3$ para rodamientos de bolas y $n = 10/3$ para rodamientos de rodillos.

1.2. Fallas en los rodamientos

La mayor fuente de fallas dentro de las máquinas de tipo rotativo es en los rodamientos. (Quiroga, et; al. 2012, pp. 14-20) expresa que aproximadamente, el 50% de las fallas en los motores eléctricos provienen de una falla en los rodamientos. (ver figura 2-1).



Figura 2-1: Principales fallas en máquinas rotativas
Realizado por: (Quiroga, et; al. 2012)

1.2.1. Principales fallas y modos de falla en rodamientos

Entre las fallas y modos de falla más comunes que afectan a los rodamientos en máquinas rotativas están (Siemens 2005):

1.2.1.1. Marcas o rayas oblicuas sobre la pista interna, externa o elementos rodantes

Este tipo de fallo aparece cuando el equipo se halla inactivo debido a estar en stand by y que entra en funcionamiento cuando el equipo principal entra en falla o cuando se lo necesite. Por lo tanto, al permanecer en este estado de inactividad, la máquina es sometida a vibraciones, lo cual resulta en las rayas o marcas sobre el elemento rodante debido a la inexistencia de lubricante.

1.2.1.2. Micro corrosión de la pista externa

La corrosión por Fretting es un proceso que es causado por las vibraciones de la máquina durante su régimen de funcionamiento.

1.2.1.3. Pista interna deteriorada

Este tipo de fallo se presente cuando el rodamiento está sometido a una excesiva carga radial debido a las vibraciones durante el régimen de funcionamiento de la máquina. Inclusive es causante de este efecto, la pobre o inexistente lubricación y el sobrepaso de la vida útil del rodamiento.

1.2.1.4. Marcas o rayas de pequeña magnitud

En este fallo, se observan marcas o rayas sobre las pistas debido a la circulación de corriente a través del cuerpo de estas, la razón de este efecto es el deterioro del aislamiento del motor eléctrico.

1.2.1.5. Deterioro puntual de la zona de trabajo de la pista externa

La falla de este tipo es producida por la evolución de varios fallos, que dependiendo de su magnitud ubica a la máquina en una zona de riesgo, por lo tanto, es muy necesario tratar de detectar este desperfecto. Además, este tipo de falla suele ser producida por la excesiva carga radial aplicada al rodamiento o por haber sobrepasado la vida útil del mismo.

1.2.1.6. Rotura de jaula o rejilla

Esta falla es producida debido a que se ha sobrepasado la vida útil del rodamiento, por lo cual, pedazos de la jaula se introducen al interior del rodamiento dificultando la libre circulación de los

elementos rodantes produciendo eventualmente un paro imprevisto del motor. Por lo tanto, es necesario tratar de detectar este fallo a tiempo o reemplazar el rodamiento de acuerdo con las frecuencias establecidas.

En la tabla 1-1, se muestra un resumen de las fallas y modos de falla de los rodamientos.

Tabla 1-1: Principales fallas y modos de falla de los rodamientos

Falla	Modos de falla
Marcas o rayas oblicuas sobre la pista interna, externa o elementos rodantes	Máquina en stand by Falta de película lubricante
Micro corrosión de la pista externa (Fretting)	Vibraciones de la máquina
Pista interna deteriorada	Carga radial excesiva Incorrecta lubricación Superación de la vida útil del rodamiento
Marcas o rayas de pequeña longitud	Circulación de corriente por el rodamiento Deterioro del aislamiento del motor eléctrico
Deterioro puntual de la zona de trabajo de la pista externa	Combinación de las demás fallas. Carga radial excesiva Superación de la vida útil del rodamiento
Rotura de la jaula o rejilla	Superación de la vida útil del rodamiento

Fuente: Siemens

Realizado por: Autores

1.2.2. Principales fallas y modos de falla en rodamientos por lubricación

La lubricación inadecuada causa múltiples modos de falla debido a exceso o escasez de lubricante.

Los daños por lubricación se presentan en cuatro etapas:

1.2.2.1. Decoloración

El contacto metal con metal provocan elevada temperatura lo que causa una decoloración en las pistas y elementos rodantes.

1.2.2.2. Rayado y descascarillado

La escasez de lubricante, su incorrecta selección, altas temperaturas y malas condiciones de operación provocan la presencia de muescas profundas en el reborde de las pistas.

1.2.2.3. Calor excesivo en el extremo del rodillo

Es provocado por la escasez de lubricante lo que provoca que las temperaturas en los elementos rodantes se eleven.

1.2.2.4. Bloqueo total del rodamiento

La elevada temperatura localizada produce el flujo de metal en los rodamientos lo que produce la alteración de la geometría original y el material de estos, produciéndose deslizamiento de los rodillos, destrucción de la jaula y aislamiento de los elementos rodantes.

1.3. Lubricación de rodamientos

1.3.1. Introducción

Estudios realizados estiman que el 85% de los fallos de rodamientos están relacionados con problemas de lubricación. Del total, el 25% son causados por contaminación, 20% debido a la elección incorrecta, el 20% lo generan el envejecimiento o fatiga del material y un 15% por falta de lubricación.

El objetivo principal de la lubricación es crear una película fina de lubricante que separe las superficies de rodadura y garantice la reducción del desgaste de los elementos mecánicos, logre disipación de calor, prevenga la corrosión, la oxidación; en definitiva, prolongue la vida útil estimada de los rodamientos en condiciones óptimas de funcionamiento.

1.3.2. Selección del lubricante para rodamientos

La selección del lubricante para rodamientos se realiza tomando en cuenta las condiciones operativas y las condiciones ambientales a las que está expuesto el rodamiento. Las condiciones operativas hacen referencia a la velocidad de operación, las cargas a las que estará sometido el rodamiento y la temperatura de operación mientras que las consideraciones ambientales son la temperatura ambiente, el grado de contaminación del medio circundante durante la operación. La selección correcta del lubricante será la que proporcione las propiedades necesarias para soportar todas las exigencias operativas y ambientales que requiere el rodamiento y garantice una vida útil prolongada establecida.

1.3.3. Lubricación con grasa.

Una grasa lubricante es una sustancia semifluida compuesta por un agente espesante, un aceite base y aditivos para condiciones especiales de operación.

GRASA = Aceite base + espesante+ aditivos

- Aceite base: Mineral o sintético
- Espesante: Con jabón de litio, aluminio, sodio, calcio, etc.
- Aditivos. Presión extrema, anti-desgaste, repelentes de agua, etc.

Las grasas de calcio se estabilizada a una temperatura de 90°C, excelente resistencia al agua y se usa en la caja de engranajes, cojinetes planos y de rodillos, mientras que, las de litio se usan a temperaturas de 40° C, presentan moderada resistencia al agua, buena propiedad de sellado y se usan en cajas de engranajes e industria en general. En un rodamiento de bolas, la viscosidad cinemática del aceite base no debe ser menor de 13mm²/s (Centistokes). Existe una relación inversamente proporcional con la temperatura, a menor temperatura mayor viscosidad. Al momento que se rompe la película lubricante empieza a incrementarse la fricción y entra en modo de fallo.

Tabla 2-1: Grados NLGI de grasas para rodamientos

Grado NGLI	Penetración a 25 °C (mm)	Aplicaciones
000 (líquida)	445 – 475	Engranajes
00 (líquida)	400 – 430	Engranajes
0 (semifluida)	355 – 385	Cojinetes. Sistemas centralizados
1 (semifluida)	310 – 340	Cojinetes. Sistemas centralizados
2 (blanda)	265 – 295	Cojinetes
3 (regular)	220 – 250	Cojinetes
4 (semidura)	175 – 205	Cojinetes lisos. Grada en briquetas
5 (dura)	130 – 160	Cojinetes. Grasa en briquetas.
6 (extradura)	85 – 115	Cojinetes. Grasa en briquetas.

Fuente: Manual SKF

Realizado por: Autores

La consistencia de la grasa está relacionada con la condición de trabajo, identificada por el grado NLGI (National Lubricating Grease Institute, de EE. UU.). Normalmente para rodamientos se emplean grados de consistencia NLGI de dos a tres; si la temperatura es muy baja se recomienda utilizar grasas más fluidas grados NLGI 0 o NLGI 1. Para temperaturas de trabajo altas es necesario emplear el de grado cuatro.

Una grasa debe reducir el coeficiente de fricción reduciendo el calor que se genera por la fricción y el desgaste, para lo cual tienen coeficientes de fricción mucho más bajos que los aceites; en definitiva, se consume menos energía utilizando grasa que aceite.

1.3.3.1. Selección de la cantidad de grasa de los rodamientos.

La selección de la cantidad de grasa lubricante para rodamientos rígidos de bolas se basa en calcular el volumen total del espacio vacío del rodamiento en centímetros cúbicos, en función de sus características constructivas, luego establecer la relación entre las velocidades de giro del rodamiento con la velocidad límite máxima límite dada en catálogos, cuyo número adimensional llevará a establecer el porcentaje del volumen vacío del rodamiento que deberá ser llenado de grasa de acuerdo a la fórmula (2).

$$V = \left[\left(\frac{\pi}{4} \right) x ((B)^2 - (D^2 - d^2)) x 10^{-9} - \frac{m}{7800} \right] 10^6 \quad (2)$$

De donde: V= Volumen en cm³; B = Ancho del rodamiento (mm); D = Diámetro exterior del rodamiento (mm); d = diámetro interno (mm) y m = peso del rodamiento (kg)

Cabe mencionar que, se necesita calcular la relación de velocidad para obtener la cantidad de grasa necesaria para el rodamiento, la cual es calculada mediante la expresión (3):

$$RV = \frac{n}{n_g} \quad (3)$$

De donde: n = Número de revoluciones en servicio (rpm) y n_g = Número límite máximo de revoluciones del rodamiento seleccionado (rpm)

Tabla 3-1: Relación de velocidad para la selección de la cantidad de lubricante

Relación de velocidad n/ng	% del espacio vacío
< 0,2	100 % llenado total
≥0,2 hasta 0,8	33 % un tercio
≥0,8	10% como máximo

Fuente: www.grupo-techgnosis.com

Realizado por: Autores

Hay que tener en cuenta que, la densidad promedio de la grasa es un 1 gr/cm³ (norma ASTM D 1298).

Para rodamientos abiertos sin grasa se emplea el siguiente método de llenado inicial, la cantidad de grasa será igual a multiplicar el número de revoluciones (n) por su diámetro interno (d) de acuerdo con las siguientes consideraciones: del 80% a 90% del espacio libre del rodamiento cuando $d*n \leq 9000$; entre el 40% a 50% del espacio libre interno cuando $90000 \leq d*n \leq 350000$ y del 20% a 30% del espacio libre cuando $d*n \geq 350000$, altas revoluciones.

1.3.3.2. Selección del tipo de grasas lubricante.

El método de selección de lubricante hoy en día se lo ejecuta de acuerdo un enfoque tribológico, tomando en cuenta la reacción de los materiales sobre la química de los lubricantes.

Para esto se toma en cuenta un sistema tribológico en el que está incluido: el tipo de movimiento sea de deslizamiento o rodadura, la velocidad de deslizamiento o rotación en el que se tomará en cuenta la teoría de la lubricación EHD (Elasto- hidrodinámica) y el factor de velocidad ($n*d_m$, velocidad de operación por el diámetro promedio del rodamiento); la temperatura que alcanza en su operación, la carga aplicada al rodamiento y las condiciones ambientales de operación. En base

a estos parámetros se seleccionará la grasa lubricante que optimice el eficaz desempeño del rodamiento.

1.3.3.3. Condición de lubricación: la relación de viscosidad k

Según SKF, cuando un rodamiento alcanza su velocidad y temperatura de funcionamiento normal, la condición de lubricación del rodamiento es:

$$k = \frac{v}{v_1} \quad (2)$$

De donde: k es la condición de lubricación del rodamiento, es decir, la relación de viscosidad, v es la viscosidad real de funcionamiento del aceite o del aceite base de la grasa (mm^2/s) y v_1 es la viscosidad nominal, en función del diámetro medio del rodamiento y la velocidad de giro (mm^2/s)

El parámetro v es obtenido mediante el gráfico 1-1.

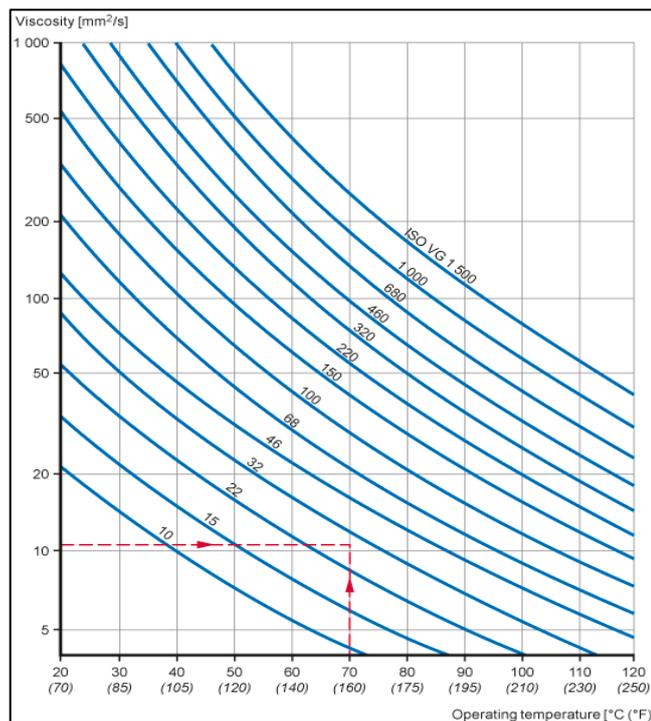


Gráfico 1-1: Diagrama para obtener el valor v
Realizado por: Lubleam

Y el parámetro v_1 es obtenido mediante el gráfico 2-1.

El método consiste seleccionar el diámetro promedio d_m de las medidas del rodamiento y proyectarlo hasta coincidir con la diagonal de la velocidad de operación en revoluciones por minuto (r.p.m.) y trazar la horizontal que nos señalará el índice de viscosidad del lubricante recomendado.

$$dm = \frac{D + d}{2} \quad (3)$$

Donde:

- Dm: diámetro medio. (mm.)
- D: Diámetro exterior del rodamiento (mm).
- d: diámetro interior (mm)

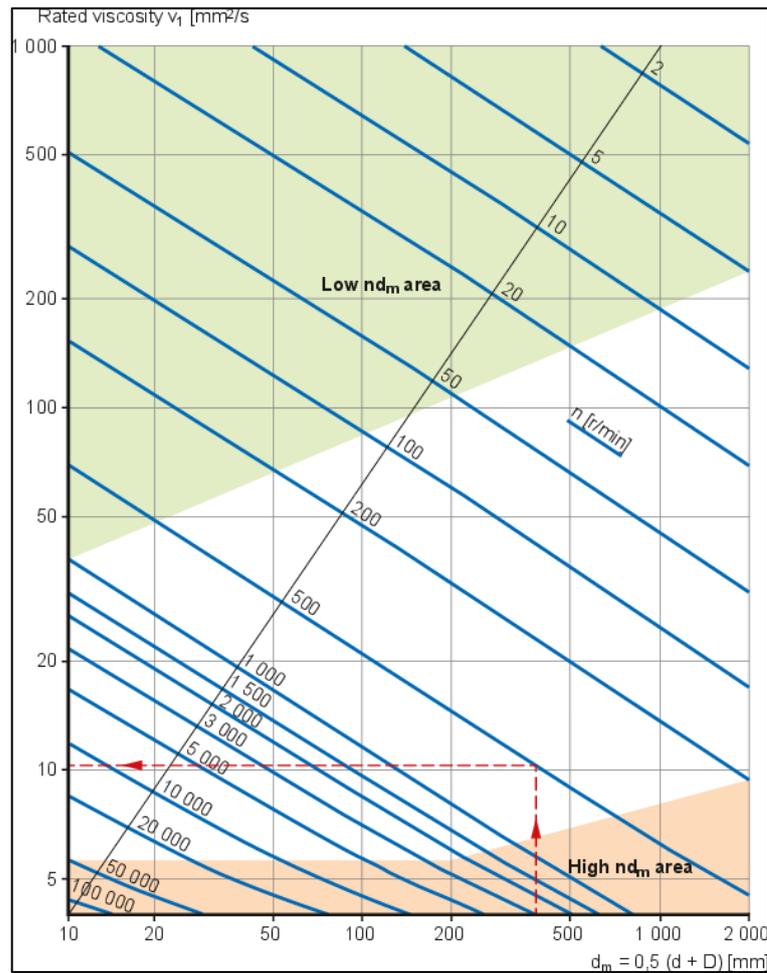
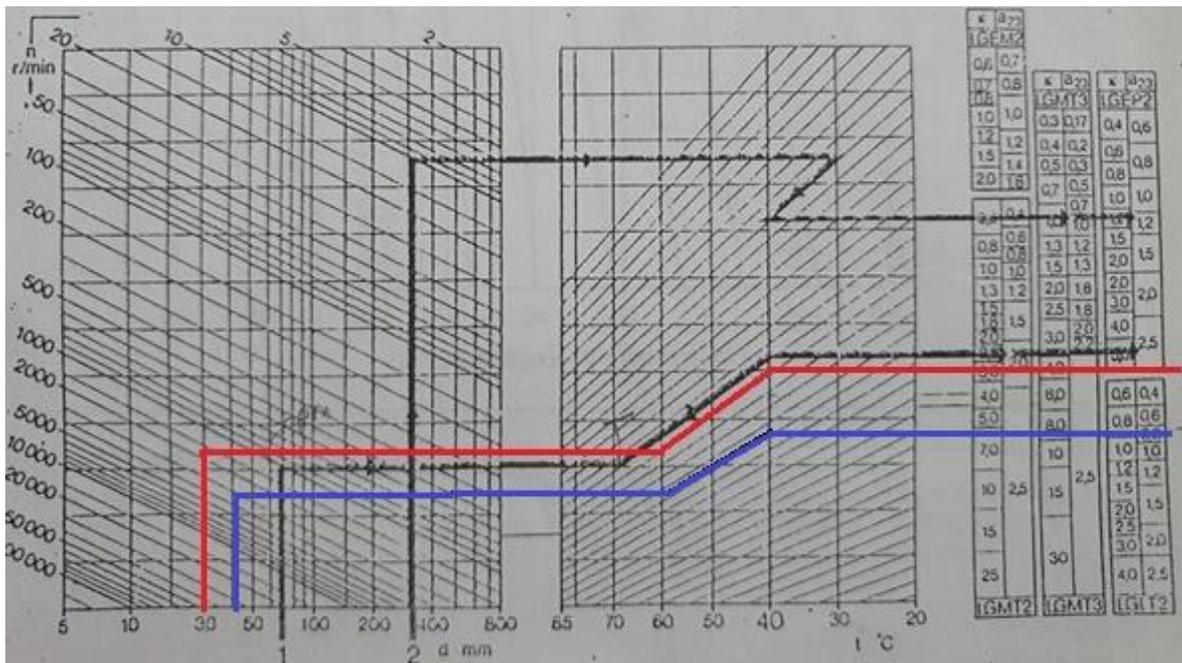


Gráfico 2-1: Diagrama para obtener v_1
Realizado por: SKF

Obtenido el valor de k se procede a determinar el tipo de grasa a utilizar mediante la gráfica 3-1.

1.3.4. Lubricación con aceite.

La lubricación con aceite se realiza cuando las condiciones de operación de los rodamientos como su velocidad, su ubicación junto a transmisiones por engranajes y otros elementos no permiten engrasarlo. Para ello se emplea métodos como baño de aceite, goteo, niebla de aceite que pulveriza y aceite en una corriente de aire.



- Velocidad: que es la rapidez con la cual viaja la onda a través de su medio de propagación, siendo la unidad de medida el centímetro/segundo (cm/s).
- Frecuencia: es el número de ciclos en una unidad de tiempo, su unidad de medida es el Hertz (Hz) que es igual a un ciclo por segundo. El rango de frecuencia del ultrasonido va desde los 2 a 13 MHz.
- Longitud de onda: es la longitud del espacio ocupado por una onda.
- Amplitud: es la altura o intensidad de la onda en un determinado tiempo. La amplitud decrece con el incremento de profundidad.

El nivel o amplitud mide las variaciones de presión, es decir, la amplitud de la onda. Dado, que las variaciones de presión audibles se encuentran en una gama amplia, variando entre $20\mu Nw/m^2$ y $10^8 \mu Nw/m^2$, se adopto para su medición una unidad logarítmica llamada decibelio (dB) en la que interviene una magnitud de referencia, que es precisamente la mínima presión audible o presión de umbral.

En la página Danish Wind Industry Association explica que, a nivel mundial, se utiliza la escala dB(A), o decibelios (A) para cuantificar las medidas del sonido. Esta escala mide la intensidad del sonido en todo el rango de las diferentes frecuencias audibles (diferentes tonos), y luego se utiliza un sistema de ponderación tomando en cuenta, el hecho de que el oído humano tiene una diferente sensibilidad ante cada frecuencia del sonido.

Además, se menciona que las personas oímos de mejor manera a frecuencias medias (rango vocal) que a altas o bajas frecuencias. Por lo tanto, el sistema dB(A) explica que la presión sonora a la frecuencia más audible tiene que ser multiplicada por valores altos, mientras que las frecuencias de menor audición serán multiplicadas por valores bajos, para de esta manera obtener un índice numérico.

La escala de decibelios es una escala logarítmica, o escala relativa, lo que quiere decir que al doblar la presión sonora o energía del sonido, el índice se multiplica aproximadamente por tres. Entonces, un nivel de sonido de 100 dB(A) contiene el doble de energía que uno de 97 dB(A). La razón de medir el sonido de esta manera es que nuestros sentidos perciben el sonido en términos del logaritmo de la presión sonora, y no en términos de presión en sí misma.

El sistema de ponderación (A) se utiliza para sonidos débiles, como en el caso de los aerogeneradores.

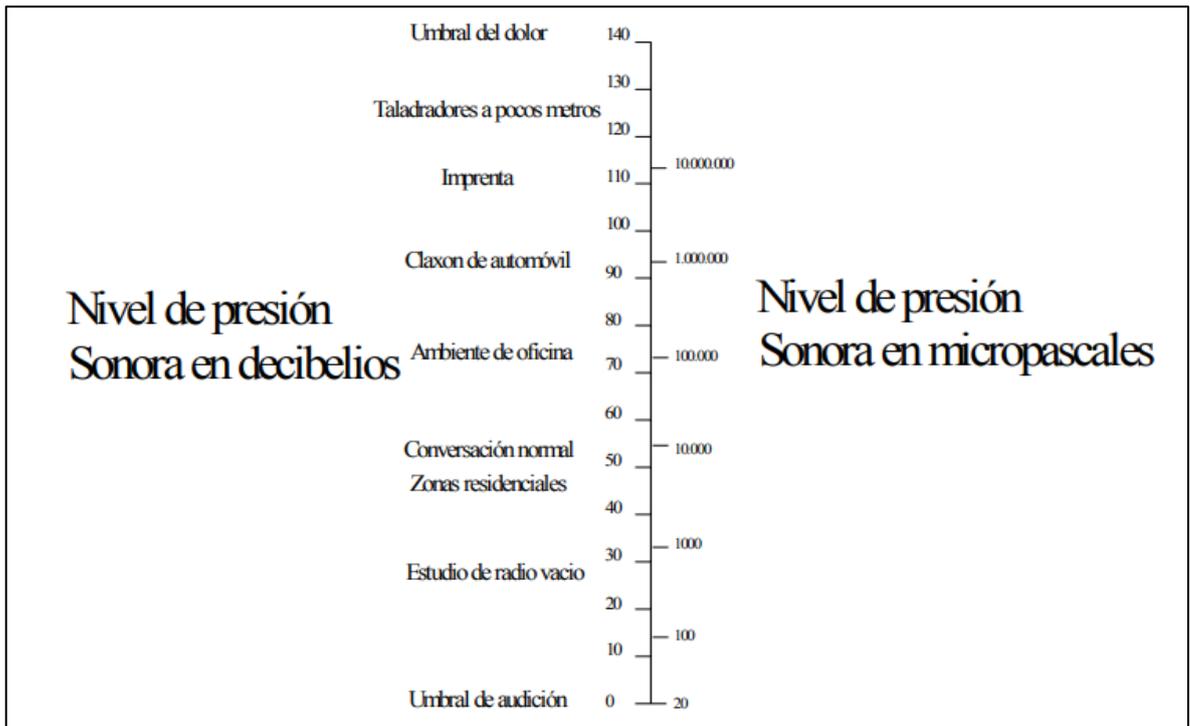


Figura 3-1: Escala Comparativa Entre Nivel de Presión Sonora en Micropascales y Nivel de Presión Sonora en Decibelios.

Fuente: https://www.ugr.es/~ramosr/CAMINOS/conceptos_ruido.pdf

1.4.3. *Análisis por ultrasonido*

El análisis ultrasónico permite detectar fallo por fatiga, fallo en la superficie del rodamiento conocido como Brinelling y el desbordamiento o falta de lubricante en el rodamiento.

La deformación de los elementos rodantes y pistas del rodamiento por fatiga del material originan un incremento del nivel de onda ultrasónica. Mientras que, una variación de amplitud que supere los 12 decibelios de una lectura previa indica que el rodamiento ha iniciado en modo de fallo. El aplanamiento de las bolas del rodamiento conocido como Brinelling producirá un zumbido constante que se identifica por un incremento de las frecuencias monitoreadas.

Dentro de las fallas en los equipos rotativos se encuentra este método que estudia las ondas emitidas por elementos de máquinas. Es aplicable para la detección de falla de fricción en máquinas rotativas, fugas en válvulas de fluidos, detección de arco eléctrico, soldaduras, mal funcionamiento de trampas de vapor

1.4.4. *Detección de fallas en rodamientos*

La detección de fallo en rodamientos se realiza mediante un análisis comparativo o un análisis histórico de la amplitud de las frecuencias ultrasónicas, cotejando las emisiones ultrasónicas de dos o más rodamientos y determinar su evolución o analizando el comportamiento y evolución de las frecuencias emitidas por el rodamiento en un tiempo determinado.

Tabla 4-1: Modos de falla en rodamiento según los decibels medidos

Modo de falla de rodamientos	Decibeles sobre la referencia	Acción
Prefalla o falta de lubricación	0 – 8	Lubricar y retomar lecturas
Primeros síntomas de inicio de fallo	10-12	Vigilar continua mente
Falla	16	Progra de reemplazo (próximo período conveniente)
Falla catastrófica	35 – 50	Remover y reemplazar inmediato

Fuente: Chevron

Realizado por: Autores

1.4.4.1. Fallas por lubricación

La falta de lubricación en un rodamiento produce el incremento en aproximadamente 8 decibeles del valor de la línea base.

1.4.4.2. Falla por exceso de lubricación

El exceso de lubricante produce un desbordamiento de la grasa del rodamiento que causa mayor resistencia a la rodadura de las bolas, incremento de calor y deformación de los sellos.

1.5. Análisis por vibración en rodamientos

El análisis de vibraciones es una técnica de diagnóstico que nos permite relacionar el nivel de vibración con la condición en la que se encuentra el equipo. Para un satisfactorio análisis de vibraciones se debe tener un buen conocimiento de la técnica de vibraciones, conocer la máquina a analizar, conocer y manejar perfectamente el equipo analizador, establecer valores estándares de vibración normales y máximos rangos admitidos, determinar la tendencia del valor último adquirido y diagnosticar cómo está evolucionando una posible falla.

Los principales fallos que se detectan a través de un análisis de vibraciones en equipos rotativos son el desbalanceo de equipos rotativos, desalineación, mal estado de los rodamientos, mal estado del lubricante, lubricación defectuosa, estado del rotor en motores, fisuras; sujeción defectuosa de equipos y bancada; holguras excesivas y problemas electromagnéticos.

1.5.1. Análisis de vibraciones en el diagnóstico de falla en rodamientos

Todo rodamiento funciona a determinada velocidad y sus elementos rodantes están diseñados para soportar cargas determinadas; durante su operación estos se convierten en fuente de emisión vibratoria ya sea por problemas de instalación, lubricación y condiciones ambientales inadecuadas. Los defectos en rodamientos pueden ser de tipo distribuidos o localizados, las rugosidades superficiales, ondulaciones sobre la pista, desalineación de las pistas son defectos

distribuidos y pueden ser generados por mala manufacturación; los defectos localizados pueden ser provocados por grietas, hendiduras, rebordes, picaduras y descascaramiento.

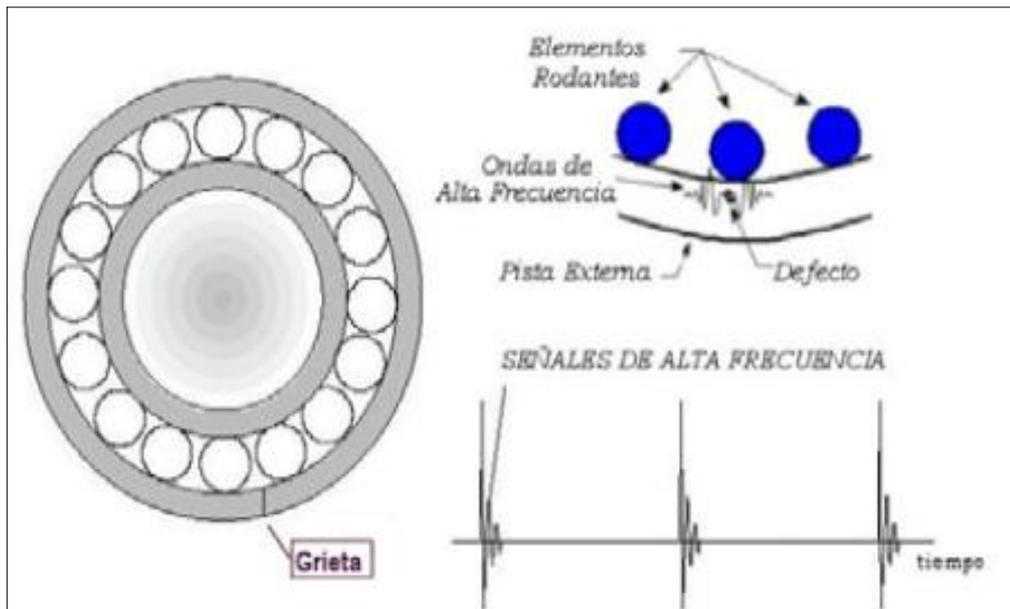


Figura 4-1: Generación de impactos por la presencia de defectos.

Fuente: (Técnicas de mantenimiento predictivo utilizadas en la industria., 2017)

Ante la presencia de defectos localizados se producen cambios de los esfuerzos de contacto en la interfaz esto genera pulsos de muy corta duración que excitan las frecuencias naturales de las pistas y soporte del rodamiento.

La presencia de componentes de alta frecuencia en el análisis vibracional es un indicador de modo de falla en su etapa incipiente.

1.5.1.1. Evolución de falla por picadura

La falla por picadura en su etapa incipiente se manifiesta por la presencia de una componente vibratoria de alta frecuencia mayor a 5 KHz por la presencia de ondas de esfuerzo. No se genera calor y las fisuras no son aún visibles.

En la segunda etapa de fallo las grietas ya son visibles y el rodamiento produce ruido; se incrementa la temperatura del rodamiento y aparecen componentes en la zona de frecuencia baja e intermedia relacionadas con la frecuencia de fallo del rodamiento.

A medida que avanza la falla se presentan bandas laterales alrededor de la frecuencia de falla o FTF y modulaciones entre las diferentes frecuencias de falla cuando la picadura se ha extendido a la pista y elementos rodantes.

En la tercera etapa cerca del fallo catastrófico el ruido se incrementa y se produce sobrecalentamiento del rodamiento, la vibración en la región de alta frecuencia disminuye, crece la componente de la velocidad de rotación y las vibraciones tienden a ser aleatorias.

A continuación, se describen las fórmulas para el cálculo de las frecuencias de falla en rodamientos

- $BPFO = 0,4 * N_B * RPM$ (5)
- $BPF1 = 0,6 * N_B * RPM$ (6)
- $BSF = 0,23 * N_B * RPM$ (7)
- $FTF = 0,4 * RPM$ (8)

Dónde:

- BPFO Frecuencia de paso por defecto en pista externa
- BPF1 Frecuencia de paso por defecto en pista interna
- BSF Frecuencia de paso por defecto en bola
- FTF Frecuencia de paso por defecto en bola
- N_b Número de bolas del rodamiento

1.5.1.2. Normativa para el control

La norma ISO 10816-1 establece las condiciones y procedimientos generales para la medición y evaluación, utilizando mediciones realizadas sobre partes no rotativas de las máquinas. El criterio general de evaluación se basa en la monitorización operacional y las pruebas de validación que han sido establecidas fundamentalmente con el objeto de garantizar un funcionamiento fiable de la máquina a largo plazo.

Esta norma reemplaza a las normas ISO 2372 e ISO 3945, que han sido objeto de revisión técnica. La normativa aplicada a esta investigación es la Norma ISO 10816-1, en la que se especifica que la clase I incluye máquinas rotativas hasta de 15 KW. En la tabla 5-1 se muestran las clases de equipo para los cuales son aplicables este tipo de norma y en la tabla 6-1 se muestran los niveles de severidad para esta clase de equipos.

Tabla 5-1: Clases de equipos según la norma ISO 10816-1

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

Fuente: Norma ISO 10816,2015

Realizado por: Autores

Tabla 6-1: Rangos de severidad según la norma ISO 10816-1

Velocidad (mm/s, RMS)	Tipos de máquinas			
	Clase I	Clase II	Clase III	Clase IV
0,18 a 0,28	A	A	A	A
0,28 a 0,45	A	A	A	A
0,45 a 0,71	A	A	A	A
0,71 a 1,12	B	A	A	A
1,12 a 1,8	B	B	A	A
1,8 a 2,8	C	B	B	A
2,8 a 4,5	C	C	B	B
4,5 a 7,1	D	C	C	B
7,1 a 11,2	D	D	C	C
11,2 a 18	D	D	D	C
18 a 28	D	D	D	D
A	Buena			
B	Satisfactoria			
C	Insatisfactoria			
D	Inaceptable			

Fuente: Norma ISO 10816,2015

Realizado por: Norma ISO 10816

1.6. Contrastes de normalidad

Las pruebas de bondad de ajuste son utilizadas para contrastar si los datos de una muestra obedecen a una determinada distribución o modelo de probabilidad (Romero, 2016). Para realizar este análisis se usan softwares estadísticos que facilitan la obtención de los resultados. Existen dos tipos de pruebas:

1.6.1. Pruebas paramétricas

Dentro de las pruebas paramétricas se hallan procedimientos estadísticos y de decisión que se fundamentan en distribuciones conocidas. Por lo cual, se busca estimar los parámetros de una población en base a su muestra. Este tipo de análisis se clasifica en:

- Prueba t student para muestras independientes
- Prueba de Shapiro-Wilks
- Prueba de Fisher

1.6.1.1. Contraste de Shapiro-Wilk

La prueba de Shapiro Wilk necesita los valores de la media y desviación estándar, inicialmente. Luego, se define la hipótesis nula que, la muestra obtenida proviene o sigue una distribución normal. Luego se determina un nivel de significancia y al final, se define una hipótesis alternativa que asevera que los datos no se ajustan a la distribución normal. Este tipo de prueba es utilizado para tamaños de muestra menores a 50 y variables cuantitativas continuas.

1.6.2. Pruebas no paramétricas

Cuando los datos no se ajustan a la distribución normal se utilizan las pruebas no paramétricas que se usan cuando las muestras son pequeñas y que se basan en la ordenación de los datos a analizar. Este tipo de prueba se clasifican en:

- Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon
- Prueba de signos
- Prueba de Wilcoxon Mann Whytney

1.6.2.1. Prueba de Wilcoxon Man Whytney

La prueba de Wilcoxon Mann Whytney es aplicada a dos muestras que son independientes que se basa en la prueba t sobre diferencia de medias en las siguientes condiciones:

- No se cumplen los supuestos en los que se basa la prueba t (normalidad)
- No es apropiado utilizar la prueba t debido a que el nivel de medida de los datos es ordinal.

Para realizar esta prueba se plantean dos hipótesis bajo el siguiente planteamiento que, las observaciones de las dos muestras tomadas son independiente y las observaciones de las dos muestras tomadas son variables ordinales o continuas.

1.6.3. Distribución de Weibull

La probabilidad de supervivencia de un elemento bajo ciertas condiciones de tiempo es determinada a través del uso de la distribución de Weibull, que dentro del campo del mantenimiento es utilizado para calcular la confiabilidad de los elementos analizados y ajustar las frecuencias de mantenimiento.

La función acumulativa de Weibull conocida como fórmula para calcular la confiabilidad dentro del mantenimiento se describe como:

$$F(t) = R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{\alpha}\right)^\beta}$$

De donde: t : es el período de tiempo para el cual se realiza el análisis; t_0 : es un tiempo inicial dado como garantía; α : es la vida promedio o parámetro de escala y β : es el parámetro de forma

1.6.4. Prueba de Kolmogorov-Smirnov

La prueba de Kolmogorov-Smirnov es un test de bondad de ajuste, el cual es empleado para muestras independiente, atendiendo variables de tipo cuantitativa continua. Además, no es necesario que los datos estén agrupados, incluso es utilizada para cualquier tamaño de muestra.

Esta prueba atiende a la pregunta ¿Se ajusta la distribución empírica de datos muestrales a una variable ordinal o cuantitativa a una distribución teórica conocida?

Debido a que es una prueba de bondad de ajuste es necesario que la hipótesis nula no sea rechazada, por lo tanto, hay que observar que el valor p sea mayor que 0,05 para que no esta no sea eliminada.

1.7. Normativas de seguridad

Las normativas de seguridad comprenden un conjunto de reglas que, la empresa u organización debe adoptar para garantizar la protección de la salud de todos sus trabajadores procurando la prevención de accidentes laborales. Además, debe tratar de buscar que el ambiente de trabajo sea amigable con todo el personal.

Dentro de las normas internacionales, la más conocida y utilizada a nivel mundial es la OHSAS 18001 que sirve para la gestión de la seguridad y salud laboral dentro de las organizaciones, la cual deriva de la normativa BS 8800 del año 1996.

1.7.1. OHSAS 18001

La normativa OHSAS 18001 busca especificar los requisitos para un sistema de gestión de seguridad y salud ocupacional que asegure que la organización o empresa controle sus riesgos y mejore el desempeño dentro de la seguridad y salud ocupacional.

Esta normativa está basada en el ciclo de mejora continua de Edward Deming que consta de cuatro etapas: Plan – Do – Check – Act; que es utilizada como herramienta para mejorar el comportamiento de la organización en cuanto a seguridad y salud ocupacional en el trabajo. Esto ayuda a que la norma mencionada sea compatible con otros sistemas estandarizados como la ISO 9001(Sistemas de Gestión de la Calidad) e ISO 14001(Sistemas de Gestión Ambiental).

La norma OHSAS es aplicable a cualquier organización que busque (OHSAS 18001 2007):

- a) Establecer un sistema de gestión de la SST para eliminar o minimizar los riesgos al personal y a otras partes interesadas que podrían estar expuestas a peligros para la SST asociados con sus actividades;
- b) Implementar, mantener y mejorar de manera continua un sistema de gestión de la SST;
- c) Asegurarse de su conformidad con su política de SST establecida;
- d) Demostrar la conformidad con este estándar OHSAS por:
 - 1) La realización de una autoevaluación y autodeclaración; o

- 2) La búsqueda de confirmación de dicha conformidad por las partes interesadas en la organización, tales con clientes; o
- 3) La búsqueda de confirmación de su autodeclaración por una parte externa a la organización; o
- 4) La búsqueda de la certificación/registro de su sistema de gestión del SST por una organización externa.

El grado de aplicación de la norma OHSAS 18001 depende de los factores tales como la política de SST de la organización, la naturaleza de sus actividades y los riesgos y la complejidad de las operaciones.

1.8. Equipos de protección personal

Los equipos de protección personal o EPP sirven para reducir los riesgos a los cuales están expuestos los trabajadores en el ambiente laboral donde se hallen. Por lo cual, resulta prioritaria, la aplicación de medidas técnicas y organizativas destinadas a eliminar los riesgos desde su origen o a proteger al personal mediante disposiciones de protección colectiva.

En el caso de la seguridad, los EPP actúan reduciendo las consecuencias derivadas de la materialización del riesgo mientras que, en la higiene industrial, los equipos suelen actuar minimizando la concentración del contaminante a la que se encuentra expuesto el trabajador.

Los requisitos que de un equipo de protección personal son:

- El equipo debe proporcionar la suficiente protección a la persona que lo utiliza.
- El equipo debe ser liviano para facilitar los movimientos.
- El equipo debe poseer una apariencia agradable
- El equipo debe ser durable y de ser posible, el mantenimiento debe ser realizable en la empresa.
- El equipo debe ser construido de acuerdo con las normas de construcción.

Los equipos de protección personal se clasifican en:

- Protección a la cabeza (cráneo)
- Protección de ojos y cara
- Protección de los oídos
- Protección de las vías respiratorias
- Protección de manos y brazos
- Protección de pies y piernas.

- Cinturones de seguridad para trabajo en altura
- Ropa de trabajo
- Ropa protectora

1.8.1. Protección de los oídos

Los equipos de protección auditiva son de uso individual que, debido a sus propiedades del material del diseño ayuda a la atenuación del sonido del ambiente de trabajo, reduciendo los efectos del ruido en la audición para evitar el daño en el oído del trabajador.

El reglamento de seguridad y salud en el trabajo del Ecuador, en su artículo 179 referente a la protección auditiva explica que:

1. Cuando el nivel de ruido en un puesto o área de trabajo sobrepase el establecido en este Reglamento, será obligatorio el uso de elementos individuales de protección auditiva.
2. Los protectores auditivos serán de materiales tales que no produzcan situaciones, disturbios o enfermedades en las personas que los utilicen. No producirán además molestias innecesarias, y en el caso de ir sujetos por medio de un arnés a la cabeza, la presión que ejerzan será la suficiente para fijarlos debidamente.
3. Los protectores auditivos ofrecerán la atenuación suficiente. Su elección se realizará de acuerdo con su curva de atenuación y las características del ruido.
4. Los equipos de protección auditiva podrán ir colocados sobre el pabellón auditivo (protectores externos) o introducidos en el conducto auditivo externo (protectores insertos).
5. Para conseguir la máxima eficacia en el uso de protectores auditivos, el usuario deberá en todo caso realizar las operaciones siguientes:
 - a) Comprobar que no poseen abolladuras, fisuras, roturas o deformaciones, ya que éstas influyen en la atenuación proporcionada por el equipo.
 - b) Proceder a una colocación adecuada del equipo de protección personal, introduciendo completamente en el conducto auditivo externo el protector en caso de ser inserto, y comprobando el buen estado del sistema de suspensión en el caso de utilizarse protectores externos.
 - c) Mantener el protector auditivo en perfecto estado higiénico.
6. Los protectores auditivos serán de uso personal e intransferible. Cuando se utilicen protectores insertos se lavarán a diario y se evitará el contacto con objetos sucios. Los externos, periódicamente se someterán a un proceso de desinfección adecuado que no afecte a sus características técnicas y funcionales.
7. Para una buena conservación los equipos se guardarán, cuando no se usen, limpios y secos en sus correspondientes estuches.

1.8.1.1. Niveles permisibles de ruido continuo

El reglamento de seguridad y salud en el trabajo del Ecuador, en su artículo 55 referente a ruidos y vibraciones explica que, en el caso de ruido continuo, los niveles sonoros, medidos en decibels con el filtro “A” en posición lenta, que se permitirán, estarán relacionados con el tiempo de exposición que se detallan en la tabla 7-1.

Tabla 7-1: Niveles permisibles de ruido continuo

Nivel sonoro/ dB (A-lento)	Tiempo de exposición por jornada/hora
85	8
90	4
95	2
100	1
110	0,25
115	0,125

Fuente: Reglamento de seguridad y salud

Realizado por: Autores

Hay que mencionar que, en ningún caso se permitirá se sobrepasará el nivel de 112 dB (A) cualquiera que sea el tipo de trabajo.

1.8.1.2. Niveles permisibles de ruido de impacto

El reglamento de seguridad y salud en el trabajo del Ecuador, en su artículo 55 explica que, el ruido de impacto es el cual cuya frecuencia de impulso no sobrepasa más de un impacto por segundo y el cual cuya frecuencia es mayor, se considera continuo. Los niveles de presión sonora máxima de exposición por jornada de trabajo de ocho horas dependerán del número total de impactos en dicho periodo, lo cual se observa en la tabla 8-1.

Tabla 8-1: Niveles permisibles de ruido de impacto

Número de impulsos o impacto por jornada de 8 horas	Nivel de presión sonora máxima (dB)
100	140
500	135
1000	130
5000	125
10000	120

Fuente: Reglamento de seguridad y salud

Realizado por: Autores

Los equipos de protección auditivos más comunes se presentan en la tabla 9-1.

Tabla 9-1: Equipos de protección auditiva

Orejeras	
Tapones	

Fuente: <http://uprl.unizar.es/doc/02%20ruido.pdf>

Realizado por: Autores

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1. Diseño del banco de pruebas

En el presente capítulo se describe cada uno de los pasos que se realizó durante el diseño del banco de pruebas para analizar modos y efectos de fallas en rodamientos por defectos de lubricación a través de ultrasonido en un simulador electroneumático, dicho proceso consta de cálculos para la selección de elementos y construcción del módulo.

2.2. Sistemas del banco de pruebas

El módulo contiene los siguientes sistemas: potencia, transmisión, pruebas y lubricación, eléctrico e hidráulico. Los cuales están detallados en la tabla 1-2.

Tabla 1-2: Datos técnicos del motor

Partes del Banco de Pruebas	Cantidad
Motor eléctrico trifásico asincrónico de 5 Hp, marca WEG, modelo TE1BF	1
Eje de acero AISI 4340	1
Acople elástico L110	1
Chumacera marca cms UC 208-24	2
Base de la chumacera ASTM A36	2
Base del motor acero ASTM A36	1
Base para la bomba hidráulica acero y placa soporte del equipo	1
Bomba manual hidráulica de presión marca SYK	1
Variador de frecuencias IG5A LS	1
Relé térmico bimetálico marca Steck	1
Tablero eléctrico	1
Pulsador de emergencia	1
Botón encendido/apagado	1
Cable de conexión	
Manómetro	1
Válvula hidráulica de alta presión	1
Mesa 80x123x85	1

Fuente: Autores

Realizado por: Autores

2.2.1. Sistema de potencia

El sistema de potencia es encargado de suministrar la energía necesaria para realizar los diferentes ensayos, el cual está constituido por un motor eléctrico de 5 HP. La elección del motor se dio debido a su fácil adquisición, por su costo accesible, por cumplir con las exigencias necesarias para el desarrollo de la prueba, principalmente. Además, de su fácil manipulación durante su arranque y toma de datos. Las especificaciones técnicas del motor se encuentran en la tabla 2-2.

Tabla 2-2: Datos técnicos del motor

Marca	WEG
Modelo	W22
Número de serie	3096
Potencia	5 HP
Intensidad	13,5/7,82/6,75
Voltaje	220/380/440 V
Frecuencia	60 Hz
Factor de potencia	0,85
Velocidad	3480
Conexión	Triángulo

Fuente: Manual WEG

Realizado por: Autores

2.2.2. Sistema de transmisión

El sistema de transmisión consta de: un eje, un acople, dos chumaceras con sus respectivos rodamientos.

2.2.2.1. Selección del eje.

Para la selección del eje se procede a calcular el par de torsión mediante la expresión (9).

$$T_n = \frac{60xP}{2x\pi x n} \quad (9)$$

De donde: P es la potencia del motor que es 5 Hp y n es la velocidad del giro del motor en revoluciones por minuto, que es 3600 rpm. Hay que tomar en cuenta que, la potencia debe estar en watts por lo tanto se realiza la conversión de unidades.

$$5 \text{ Hp} \times \frac{0,75 \text{ KW}}{1 \text{ Hp}} \times \frac{1000 \text{ W}}{1 \text{ KW}} = 3750 \text{ Watts}$$

Entonces, aplicando la fórmula (9) se obtiene:

$$T_n = \frac{60(3750 \text{ Watts})}{2(\pi)(3600 \text{ rpm})} = 9,94 \text{ N.m}$$

Con el par calculado se decide obtener un acero de transmisión AISI 4340 (Acero al molibdeno + cromo + níquel) alta dureza y resistencia en alta temperatura por su alta resistencia en caliente. Y fácil adquisición dentro del mercado local, además de poseer propiedades apropiadas para los ensayos que se van a realizar en el banco de pruebas. (SAE, 2015).

Las propiedades del acero AISI 4340 se describen en la tabla 3-2.

Tabla 3-2: Propiedades del acero AISI 4340

Composición Química				
%C	%Si	%Mn	%P	%S
0,34	0,1 - 0,35	0,60 – 0,80	0,04 – 0,30	0,002 – 0,03
Propiedades Mecánicas				
Diámetro (mm)	Resistencia Mecánica (N/mm ²)	Punto de fluencia (N/mm ²)	Elongación % Min.	Dureza ROCKWELL B
16 o menos	1200 -1400	1000	9	240 – 380
16 – 40	1100 – 1300	900	10	240 – 380
41 - 100	1000 – 1200	800	11	240 - 380

Fuente: (SAE, 2015).

Realizado por: Autores

Para el cálculo del diámetro del eje de acero se aplica la expresión (10) que fue tomada del libro de resistencia de materiales de Russel Hibbeler:

$$T_{max} = \frac{Txc}{\left(\frac{\pi}{2}\right)c^4} \quad (10)$$

De donde: T_{max} es el torque máximo según el material utilizado, T es el torque nominal y c es el radio del eje. Entonces, partiendo de c se obtiene el diámetro (d) que es igual a d/2 y reemplazando en la ecuación (6), se obtiene la expresión (11)

$$T_{max} = \frac{16Tn}{(\pi)d^4} \quad (11)$$

Entonces de la ecuación se necesita despejar c, obteniéndose la expresión (12). Cabe mencionar que, el torque nominal en los motores asincrónicos es del doble por lo tanto Tn es igual a 20,6 N.m.

$$d = \sqrt[3]{\frac{16xT_n}{\pi x T_{max}}} = \sqrt[3]{\frac{16x(19,6 N.m * 10^3)}{\pi x (370x10^6 Pa)}} = 17,57 mm$$

Hay que mencionar que, el torque máximo es tomado de la tabla 3-3, referentes a las propiedades del acero AISI 4340. Entonces, se procedió aumentar el diámetro calculado a 40 mm con el fin de aumentar la confiabilidad del sistema y mejorar la seguridad debido a que el eje va a ser sometido cargas radiales altas.

2.2.2.2. Selección del acople

Para la selección del acople se utilizó el par torsor calculado para la selección del eje que es de 20,6 N.m. Por lo cual, se eligió un acople de tipo flexible L110 marca Lovejoy Jaw, debido a que cumple con las exigencias dadas para velocidad y torque nominal.

El acople flexible tiene ventajas relevantes como el de amortiguador y aislador de vibraciones, en ciertas ocasiones funciona como aislante eléctrico, no necesita lubricarse, su mantenimiento es

fácil, ayuda a la alineación, por lo cual resulta óptimo para los fines del presente trabajo. En la tabla 4-2, se detallan las características del acople elástico utilizado.

Tabla 4-2: Características del acople elástico L110 marca Lovejoy Jaw

Tamaño del acoplamiento (mm)	Torque Nominal (N.m)	Velocidad máxima (rev/min)	Orificio piloto A	Diámetro máximo A	Diámetro total B	Longitud de ensamble L	Ancho del cubo C	Diámetro del cubo D	Masa Kg
110	105	5000	15	42	84	108	43	84	3

Fuente: Challenge
Realizado por: Autores

Mientras que, en la figura 1-2 se muestra el diseño y forma del acople elástico L110, marca Lovejoy Jaw.

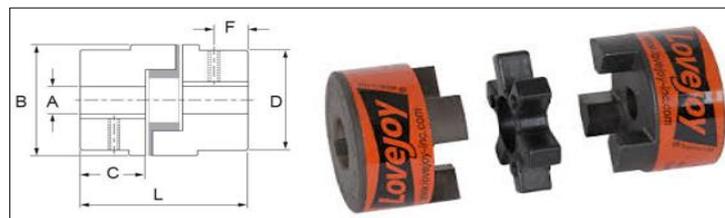


Figura 1-2: Acople elástico L110
Realizado por: Challenge

2.2.2.3. Selección de las chumaceras

Las chumaceras elegidas para el presente trabajo fueron del tipo UCP 208 debido a que tienen características notables como: auto alineamiento que se da debido a que el anillo externo del rodamiento es de forma esférica para acoplarse de manera directa en el alojamiento del soporte.

En el diseño del banco de pruebas se contempló la colocación de dos chumaceras, la primera en el lado carga (acople elástico) y la segunda en el lado libre. Cabe mencionar que, ambos elementos son idénticos en peso, tamaño y forma debido a que van a soportar el mismo tipo de esfuerzo radial. En la tabla 5-2 se muestra sus características.

Tabla 5-2: Características de la chumacera UCP 208

Código IBCA	Diámetro del eje (mm)	Dimensiones (mm)										Masa (Kg)
		H	A	E	B	S1	S2	G	w	Bi	n	
UCP 208	40	49,2	184	137	54	17	21	19	98	49.2	19	P208

Fuente: Challenge
Realizado por: Autores

En la figura 2-1, se detallan las diferentes dimensiones expuestas en la tabla para la chumacera UCP P208.

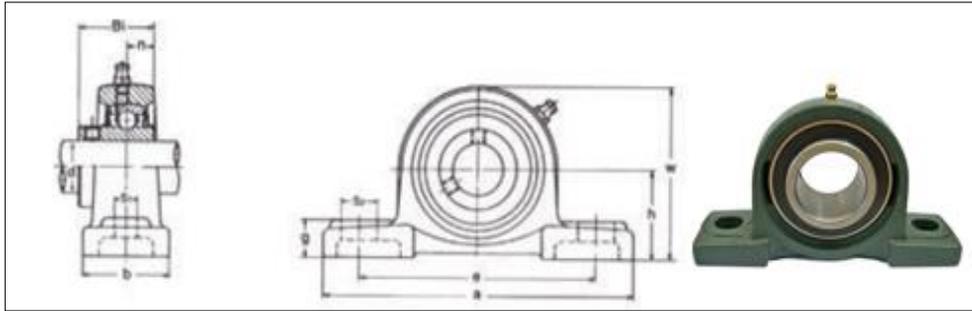


Figura 2-1: Dimensiones y geometría de la chumacera UCP 208
Fuente: Challenge

2.2.3. Sistema de pruebas

El sistema de pruebas consta de dos partes: rodamiento de prueba y cubo porta rodamientos.

2.2.3.1. Selección del rodamiento

El rodamiento seleccionado es el SKF 6206 rígido de bolas de simple hilera debido a que es el más utilizado, gracias a su versatilidad para su uso en múltiples campos de la industria, además soporta altas velocidades y cargas. Para el presente módulo se necesita de solo un rodamiento, el cual va montando sobre el eje y a su vez, está contenido en un cuadro porta rodamientos.

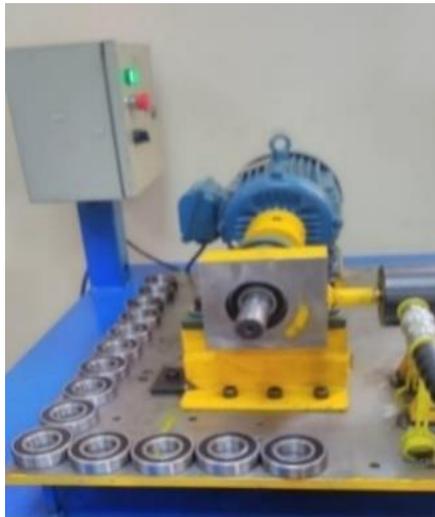


Figura 3-2: Rodamientos utilizados en las pruebas
Fuente: SKF

La figura 4-2, muestra el rodamiento seleccionado y en la tabla 6-3, se detallan las características de este.

El módulo de prueba se ha diseñado de tal forma que facilite la intercambiabilidad del rodamiento una vez realizado el ensayo y permita la utilización de los equipos de ultrasonido y vibraciones.

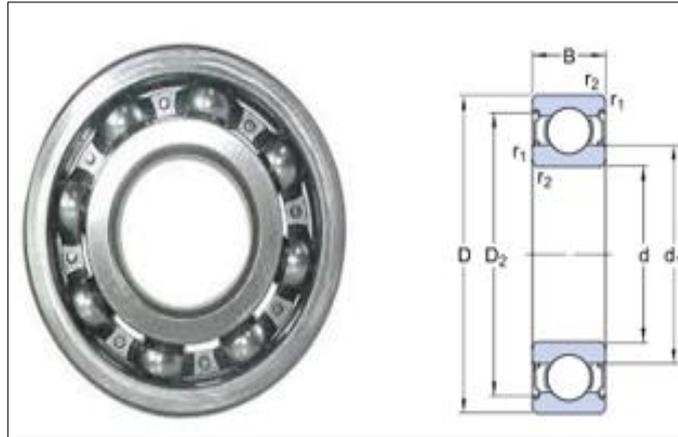


Figura 4-2: Dimensiones y geometría del rodamiento 6206
Fuente: SKF

Tabla 6-2: Dimensiones del rodamiento 6206

Dimensiones (mm)					Rango de carga (kN)		Velocidad límite (RPM)	Masa (kg)	Designación
D	D	B	d1	D2	C	Co			
30	62	16	40,36	54,06	32,5	19	15000	0,20	6206

Fuente: SKF

Realizado por: Autores

En el anexo A se muestra el catálogo SKF de donde se obtuvo los datos del rodamiento seleccionado.

2.2.3.2. Cálculo del llenado de grasa inicial del rodamiento.

Para efectuar este cálculo se aplicaron los datos expuestos en la tabla 6-3. Entonces se realiza el siguiente procedimiento:

- 1) Cálculo del espacio vacío del rodamiento 6206. Para tal razón se utiliza la fórmula (2) expuesta en el capítulo I. Hay que mencionar que, la densidad de la grasa es de 1 gr/cm^3

$$V = \left[\left(\frac{\pi}{4} \right) \times (16) \left((62)^2 - (30)^2 \right) \times 10^{-9} - \frac{0,20}{7800} \right] \times 10^6 = 11,35 \text{ cm}^3$$

- 2) Se calcula la relación de velocidad mediante la expresión (3).

$$RV = \frac{3600}{16200} = 0,22$$

Entonces, utilizamos la tabla 3-2 que relaciona el valor de velocidad relativa de lo que se deduce que: con el valor de 0,22 calculado, revisamos la tabla que corresponde a un porcentaje de 33%. Por lo tanto, para una relación de velocidad de 0,22 se deberá lubricar el 33% del volumen total $11,35 \text{ cm}^3 \times 33\% = 3,75 \text{ cm}^3$. Considerando que, la densidad de la grasa es 1 gr/cm^3 según la norma ASTM D 1298, se colocara 3,75 gramos de lubricante

2.2.3.3. Construcción del cubo de pruebas de rodamientos

Con el fin de brindar contención al rodamiento seleccionado se construyó un cuadro en acero ASTM A36 de 115 mm de alto, 125 mm de largo, 40 mm de espesor y en el centro se realizó un mecanizado circular de 80 mm de diámetro para que ingrese el rodamiento libremente. Además, se realizó una perforación en unos de sus lados para que ingrese la boquilla de la bomba hidráulica. En la figura 5-2 se muestra el diseño de la pieza mencionada.

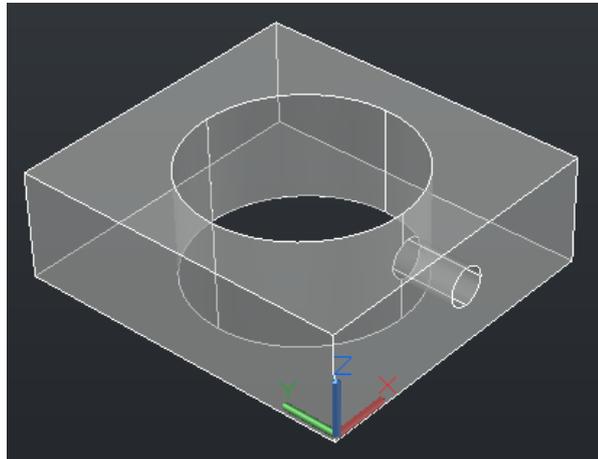


Figura 5-2: Porta rodamientos
Fuente: AutoCAD

2.2.4. Sistema hidráulico

El sistema hidráulico utilizado en el banco de pruebas es una bomba hidráulica de mano de la marca SYK, la cual tiene la función de producir una carga al rodamiento para producir el fallo. En la figura 6-2 se observa la bomba utilizada junto a sus partes, las cuales son descritas en la tabla 7-2.

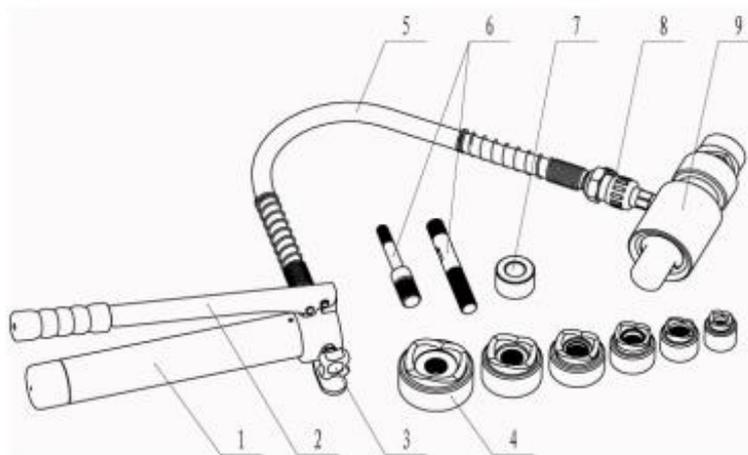


Figura 6-2: Bomba hidráulica manual
Fuente: Manual SYK Series

Tabla 7-2: Partes de la bomba hidráulica de mano

Código	Nombre	Función
1	Bomba	Para reponer el aceite
2	Mango activo	Para operar el equipo
3	Tornillo de regulación	Para liberar la presión y retraer el pistón
4	Troquel	Para perforar el agujero
5	Manguera del aceite	Lleva el aceite
6	Guía del troquel	
7	Espaciador	Para proteger la cabeza de perforación
8	Acople	Sirve para conectar
9	Carcasa del troquel	Sirve para contener al troquel

Fuente: Manual SYK Series

Realizado por: Autores

Es necesario aclarar que, para evitar el retroceso de la presión suministrada por la bomba se adaptó una válvula hidráulica de alta presión de ½ pulgada, la cual se muestra en la figura 7-2.



Figura 7-2: Válvula hidráulica de alta presión

Fuente: Autores

También, se acoplo un manómetro para observar la presión suministrada por la bomba hidráulica manual (ver figura 8-2).



Figura 8-2: Manómetro

Fuente: Autores

2.2.4.1. Selección del lubricante

Para la selección del lubricante se ha utilizado el método descrito en el capítulo I, para lo cual se necesita el diámetro medio que es calculado a través de la formula (4).

$$dm = \frac{(62 + 30)}{2} = 46 \text{ mm}$$

Con este valor de 46 mm se ubica en la línea horizontal a diámetro medio y se proyecta hasta llegar a la línea correspondiente a la velocidad de 3600 rpm para luego trazar una línea horizontal que converge la temperatura de funcionamiento que es 60°C, para luego proyectarse diagonalmente hasta la temperatura ambiente que es 40°C y de ahí se proyecta una línea horizontal hacia la derecha, que en base al valor de k y a23 se seleccionó el lubricante. Este proceso se describe en la gráfica 9-2 mediante la línea azul.

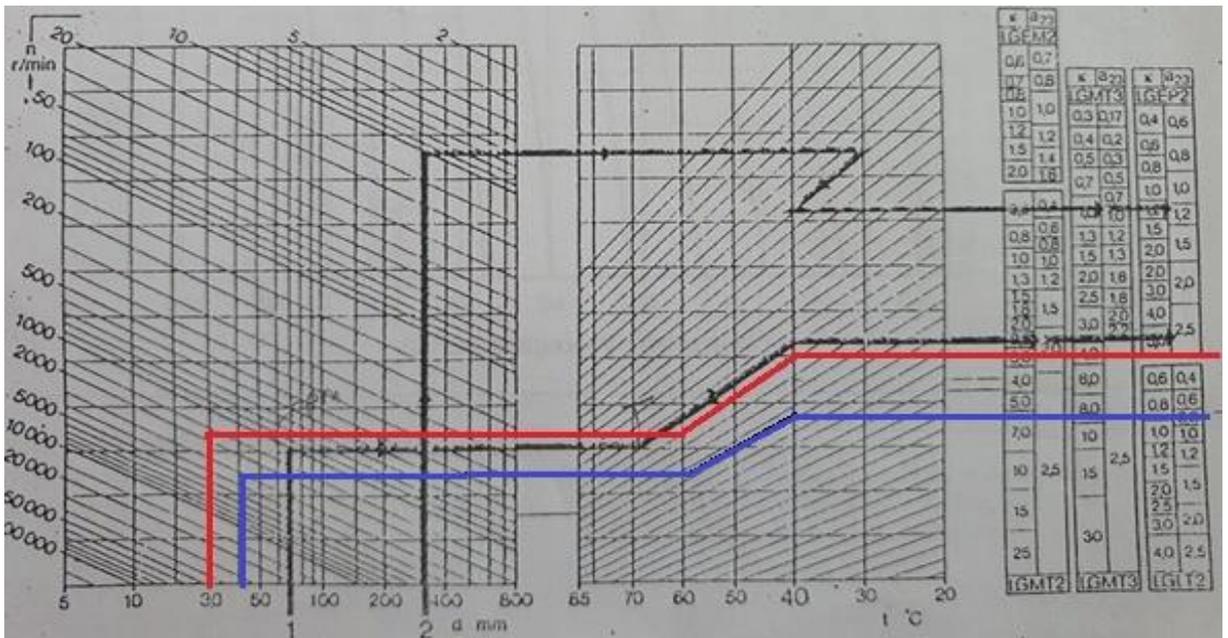


Gráfico 1-2: Gráfica selección del lubricante

Fuente: Repsol

De la gráfica 8-3, se determina que la grasa a aplicar es de tipo LGMT2 o NLGI 2. Para sustentar esta selección se tomó en cuenta la carga aplicada, temperatura y velocidad. En la tabla 8-2 se detallan las características del lubricante seleccionado.

Tabla 8-2: Características del lubricante seleccionado

Designación	NLGI 2
Espesante	Litio
Color	Marrón Rojizo
Tipo de aceite base	Mineral
Rango de temperatura de funcionamiento	De -30 a + 120 ° C
Viscosidad del aceite base	A 40 °C 110 mm ² /s A 100 °C 11 mm ² /s
Punto de goteo	>180 °C

Fuente: Manual SYK Series

Realizado por: Autores

2.2.5. Sistema eléctrico

El sistema eléctrico del banco de pruebas consta de:

- Un arrancador de dos posiciones: que sirve para encender y apagar el motor.

- Un indicador: que sirven para observar cuando el motor este encendido mediante el indicador de color verde.
- Un botón de paro de emergencia: que sirve para apagar el motor rápidamente cuando se suscite algún inconveniente.
- Un variador de frecuencia: que sirve para cambiar la velocidad del motor. El cual es de marca iG5A LS (ver figura 9-2).

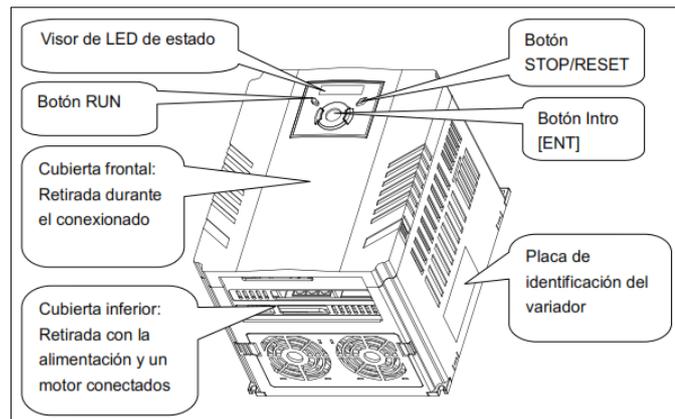


Figura 9-2: Variador de frecuencias

Fuente: Manual IG5A LS

- Un interruptor de arranque sirve para proteger al motor de una posible sobrecarga. El dimensionamiento de este dispositivo se da a través de la corriente que es de 13.5 amperios. El interruptor elegido fue de la marca STECK SDZ3 P C10 (ver figura 10-2).



Figura 10-2: Relé térmico bimetalítico

Fuente: Manual Steck

- Cableado: sirven para transportar la energía eléctrica desde la fuente principal hacia los elementos de control y consumidores finales.

La selección del calibre del conductor se da en función de la intensidad, que según la placa es de 13,5 amperios es de 12 AWG, el cual soporta hasta una intensidad de 20 amperios resultando ideal para la carga aplicada en el banco de pruebas.

- Tablero eléctrico: es donde se ubican los elementos de control.



Figura 11-2: Tablero eléctrico
Fuente: Autores

2.3. Diseño y montaje de la estructura del banco de pruebas.

2.3.1. Bosquejo inicial

El bosquejo inicial del banco de pruebas constaba de

- Una placa de acero de 70 mm de largo, 50 mm de ancho y 10 mm de espesor
- Una base para el motor de 80 mm de largo, 19 mm de ancho y 18 mm de espesor.
- Cuatro bases para colocar las chumaceras de 90 mm de alto, 50 mm de ancho y 50 mm de espesor.
- Una base para la carcasa del troquel, que está compuesto de dos bases piramidales de 70 mm de altura, 13 mm de base menor y 26 mm de base mayor, las cuales fueron soldadas a la placa base, y una base de forma rectangular de 26 mm de espesor, 125 mm de ancho y 185 mm de alto, la cual es empernada a las bases triangulares con el objetivo de realizar el desmontaje del módulo porta rodamientos durante los diferentes ensayos.
- La placa de acero estará montada sobre una mesa de acero construida con soportes de tubo cuadrado de 750 mm y espesor de 3mm, una placa superior de 1200 mm de largo por 1000mm de ancho y 5mm de espesor reforzada con platinas de acero por la parte inferior para evitar el pandeo durante la fijación y nivelación de la placa porta motor y sistemas de prueba.
- La placa porta sistema de prueba contará con cuatro pernos de facilitarán su nivelación que garantice el perfecto montaje de todos los mecanismos del módulo de prueba.
- La mesa soporte del módulo será montada sobre bases de amortiguamiento y aislamiento de vibraciones.

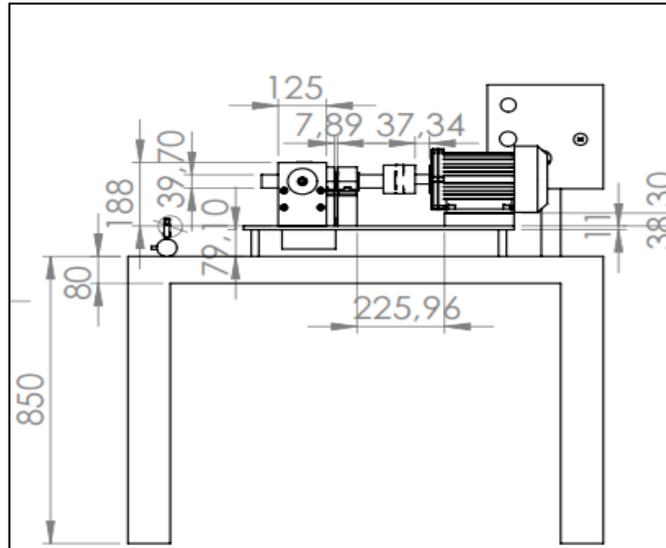


Figura 12-2: Bosquejo inicial
Fuente: Autores

2.3.2. *Diseño final*

El diseño final del banco de pruebas consto de varias modificaciones principalmente en la construcción de:

- Una mesa de 80 mm de ancho, 1230 mm de largo y 850 mm de alto, a la cual se anclo y soldó la placa de acero realizada inicialmente.
- Para reforzar las bases de las chumaceras se soldó bases rectangulares de 75 mm de alto, 50 mm de espesor y 60 mm ancho; se realizó esto con el fin de obtener mayor fijación a la placa debido a que se van a soportar altas cargas durante los ensayos.
- Se realizó una agarradera circular para el cuerpo de la bomba hidráulica debido a que se presentan grandes vibraciones durante los ensayos, por lo cual surge la necesidad de sujeción de este elemento.



Figura 13-2: Banco de Pruebas
Fuente: Autores

2.3.3. Montaje de los sistemas en la estructura

Una vez realizada, las diferentes modificaciones a la estructura que soportara los sistemas del banco de pruebas se procedieron al montaje de la siguiente manera.

- 1) Montaje del motor: se procedió al montaje del motor en su respectiva base (ver figura 14-2).

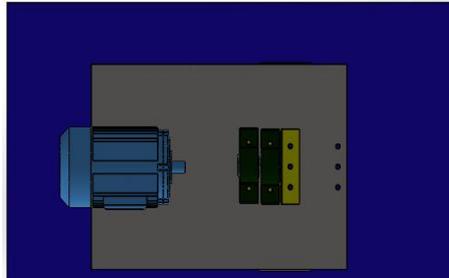


Figura 14-2: Tablero eléctrico
Fuente: Autores

- 2) Montaje de las chumaceras: en la figura 15-2 se muestra la colocación de las chumaceras en sus respectivas bases.

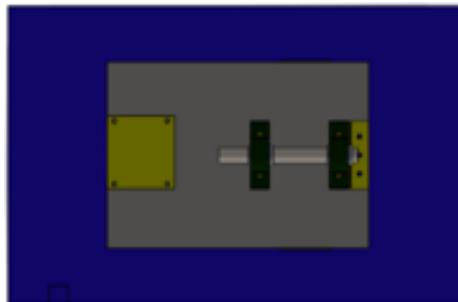


Figura 15-2: Chumaceras
Fuente: Autores

- 3) Montaje del eje y acople elástico. En la figura 16-2, se indica el montaje del eje final del motor hacia el acople flexible y el eje mayor o secundario este acoplado

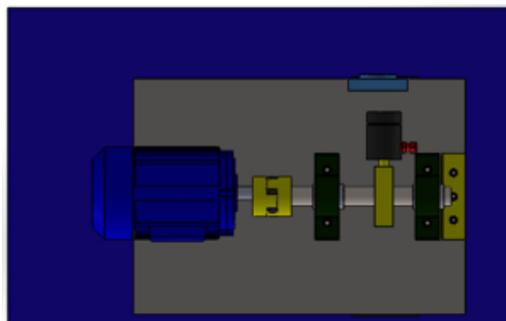


Figura 16-2: Eje y acople elástico
Fuente: Autores

- 4) Montaje del porta rodamientos y sistema hidráulico: en la figura 17-2 se muestra el montaje del porta rodamientos junto a la bomba manual hidráulica, lo cual servirá para realizar llegar a cumplir los objetivos del trabajo de titulación mediante los diferentes ensayos previstos.

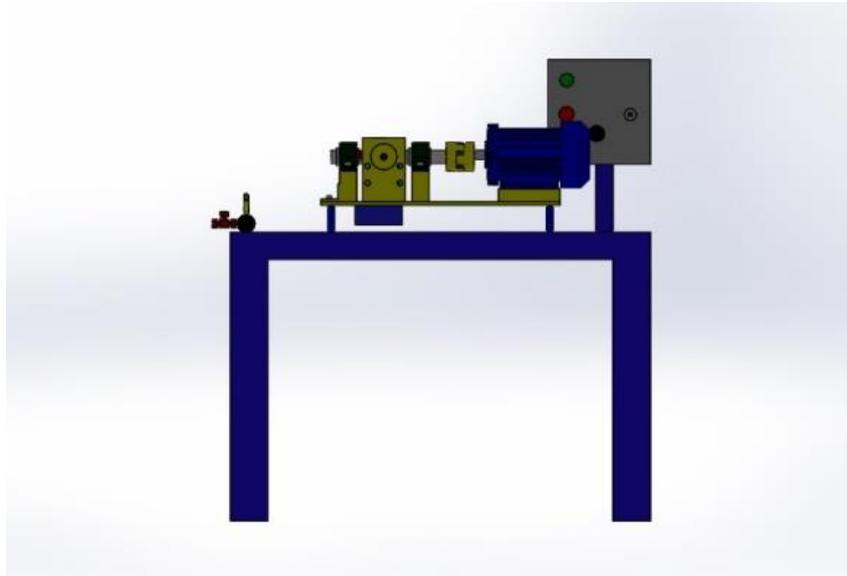


Figura 17-2: Montaje final
Fuente: Autores

- 5) Alineación. Terminado el montaje de los sistemas del banco de pruebas se realiza la alineación respectiva para evitar vibraciones como se muestra en la figura 18-2, lo cual garantiza un óptimo funcionamiento y alista al banco de pruebas para la toma de datos.



Figura 18-2: Alineación del motor y chumaceras
Fuente: Autores

Para realizar una adecuada alineación se utilizó el equipo Optaling Plus (foto), que consta de un software y dos bases que contiene un emisor laser y un receptor o espejo. Este equipo permite evaluar la alineación vertical y horizontal.

1. Se colocó las bases porta emisor laser en el lado conductor y el receptor o espejo en el lado conducido.

2. Se enciende el equipo y se ingresan las medidas que solicita en software.
3. Se centro la luz laser del emisor y del receptor.
4. Se ejecuta la alineación
5. Se procede a girar el eje a 180° en sentido horario y antihorario hasta que el indicador señale la toma total de puntos de medición.
6. Se presiona el tercer botón para obtener el informe de alineación.
7. Con los datos obtenidos, se procede a corregir las desviaciones especificadas en el sistema mediante shim de 0,127 y 0,025 mm (ver figura 19-2). Además, se utilizó relojes comparadores (ver figura 20-2) para mayor precisión en la alineación.



Figura 19-2: Shim para alineación
Fuente: Autores



Figura 20-2: Relojes comparadores
Fuente: Autores

Los valores presentes en la tabla 9-2 corresponden a los valores permisibles dados por el manual del fabricante para una correcta alineación cuyos valores deben estar debajo del 0,08 mm de desviación en cualquier sentido.

Tabla 9-2: Partes de la bomba hidráulica de mano

Desalineación angular del eje conducido	Desalineación angular del eje conductor	Desalineación paralela del conducido	Desalineación paralela del conductor	Desalineación de la altura de la parte delantera	Desalineación de la altura parte posterior	Desalineación lateral de la parte delantera del eje conducido	Desalineación lateral de la parte posterior del eje conducido
-0,01	0,00	0,02	0,01	0,00	-0,00	-0,01	0,00

Fuente: Autores

Realizado por: Autores

En el anexo B se presenta el proceso de construcción del módulo de forma más detallada y en el anexo C se encuentra un plano del módulo completo.

CAPÍTULO III

3. MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1. Procedimiento para la medición y toma de datos.

Para la obtención de datos en los ensayos fueron utilizados 15 rodamientos 6206, para el cálculo del tiempo de fallo de los rodamientos en el banco de prueba, de los cuales fueron preparados cinco unidades con el 100%(3.0gr) de su grasa nominal calculada, los cinco siguientes rodamientos fueron preparados con el 200% de grasa nominal (6.0 gr) creando una condición de sobre lubricación y finalmente las últimas cinco unidades fueron preparadas con el 50% de su grasa nominal (1.5 gr). Los ensayos fueron realizados a una velocidad de rotación de 1800 rpm con una carga aplicada de 400 psi a través de una bomba manual hidráulica. Para la adquisición de los datos y el monitoreo de la condición del rodamiento de prueba se utilizó el equipo de análisis de ultrasonido ULTRAPROBE 1500, lo cual fue complementado mediante el analizador de vibraciones VIBRACHEK 200

3.1.1. *Equipo de ultrasonido ULTRAPROBE 15000*

La técnica de ultrasonido es muy usada dentro del mantenimiento predictivo, pues el análisis de las ondas que emiten las máquinas junto a sus elementos, las cuales que se encuentran fuera del rango de las frecuencias audibles al ser humano, ayudan a la detección de los fallos. Para este fin, se utilizó el equipo de ultrasonido ULTRAPROBE 15000 para realizar mediciones en las pruebas con los rodamientos 6206.



Figura 1-3: Equipo de ultrasonido ULTRAPROBE 1500
Fuente: UE System Inc.



Figura 2-3: Accesorios del equipo ULTRAPROBE 15000
Fuente: UE System Inc.

3.1.2. *Equipo de vibraciones VIBRACHECK 200*

Este equipo es un elemento valioso en la industria dentro del campo del mantenimiento predictivo porque posee un potente analizador de vibraciones mecánicas conformado por un colector de datos y balanceador, lo cual es excelente para asegurar y mantener la confiabilidad en máquinas.



Figura 3-3: Analizador de vibraciones Vibracheck 200
Fuente: Autores

3.1.2.1. *Principales características del equipo*

Dentro de las características principales del equipo se menciona:

- Posee dos entradas dinámicas para conectar acelerómetro y sensores de proximidad.
- Toma medidas de aceleración y velocidad.
- Toma medidas de espectros y formas de onda en ruta y fuera de ruta.
- Analiza arranques y paradas de maquinas

3.1.3. Localización del punto de prueba

El punto de prueba fue determinado para una rápida toma de lecturas y facilidad en el intercambio del elemento de prueba, para mejor precisión en la toma de datos se debe baso la elección de los puntos de medición en los lineamientos de la norma ISO 10816-1 que establece que los puntos de medida son tres, dos puntos ortogonales en dirección radial y uno axial, como se indica en la figura 4-3.

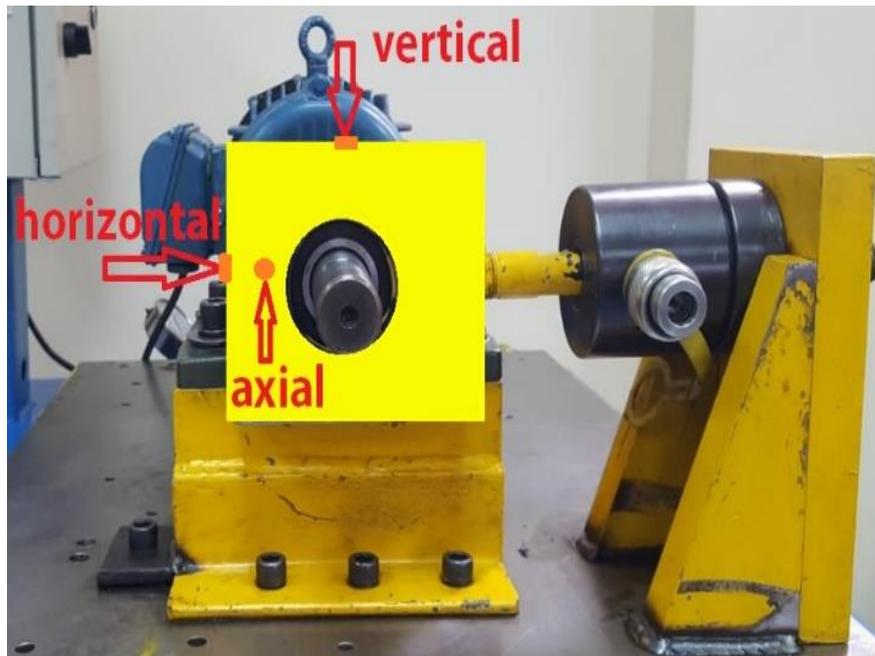


Figura 4-3: Caja porta rodamiento
Fuente: Autores

3.1.4. Cálculo de frecuencia de fallas generadas por el rodamiento de prueba 6206

El sistema del banco de prueba fue programado para que gire a 3600 rpm o 60 Hz mediante un variador de frecuencias, con lo cual se establece la tabla 1-3, las frecuencias de fallo que fueron obtenidas mediante las fórmulas (5), (6), (7) y (8) expuestas en el capítulo II.

Tabla 1-3: Frecuencias de fallos de rodamientos

Frecuencia de falla	Frecuencia (Hz)	Frecuencia (CPM)
FTF	24	1440
BSF	124	7440
BPFO	216	12960
BPFI	324	19440

Fuente: Autores

Realizado por: Autores

En la tabla 2-3 y 3-3 se detallan los armónicos en hercios y ciclos por minuto en función de las frecuencias de fallas de la tabla 1-4.

Tabla 2-3: Armónicos de la frecuencia de fallos en rodamiento en Hercios

	2X	3X	4X	5X	6X	7X	8X	9X	10X
FTF	48	72	96	120	144	168	192	216	240
BSF	248	372	496	629	744	868	992	1016	1240
BPFO	432	648	864	1080	1296	1512	1728	1944	2160
BPFI	648	972	1296	1620	1944	22168	2592	2916	3240

Fuente: Autores

Realizado por: Autores

Tabla 3-3: Armónicos de la frecuencia de fallos en rodamiento en Ciclos por minuto

	2X	3X	4X	5X	6X	7X	8X	9X	10X
FTF	1440	2160	2880	3600	4320	5040	5760	6480	7200
BSF	7452	11178	14904	18630	22356	26082	29808	33534	37260
BPFO	12960	19440	25920	32400	38880	45360	51840	58320	64800
BPFI	19440	29160	38880	48600	58320	68040	77760	87480	97200

Fuente: Autores

Realizado por: Autores

3.1.5. Toma de mediciones en condiciones normales.

Para el inicio de los ensayos se tomó mediciones en condiciones operativas normales de funcionamiento (carga=0 y 3600 rpm), aplicadas al rodamiento 6206; lo que significa que se obtendrá un análisis espectral sin indicadores de fallas en los espectros y se tomará a este como espectro base del monitoreo.

La figura 5-3 muestra el espectro que se tomó como base para el análisis del desarrollo de los modos de falla que presentarán los rodamientos sometidos a carga y cuando las condiciones de lubricación sean modificadas. Hay que mencionar que, en esta figura no se encuentran armónicos que coincidan con los armónicos de falla.

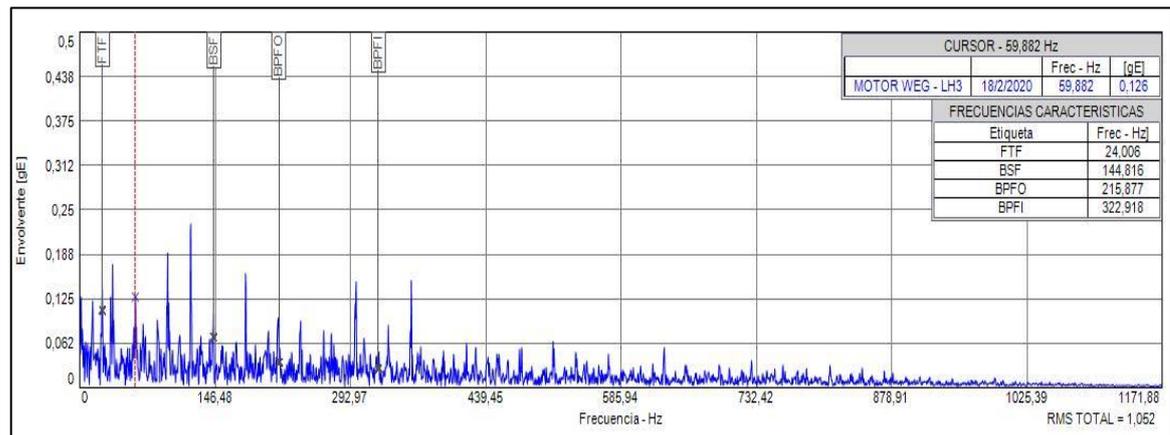


Figura 5-3: Espectro de medición base

Fuente: MainTraq Predictive

Como se observa en el espectro de envolvente no existen armónicos en las frecuencias de falla en los rodamientos como se muestra en la tabla 4-3.

Tabla 4-3: Valores de la frecuencia de fallo en condiciones normales de funcionamiento

Frecuencias de fallos de rodamientos	Frecuencia (Hz)
FTF	24.006
BSF	144.816
BPFO	215.877
BPFI	322.918

Fuente: Autores

Realizado por: Autores

3.1.6. Mediciones en condiciones normales de funcionamiento con el equipo de ultrasonido

Para inicio de la obtención de datos con ultrasonido se procedió a tomar las mediciones en condiciones normales de funcionamiento del rodamiento 6206 (cero cargas, 3600rpm), el gráfico obtenido servirá de base para comparar la evolución del modo de falla obtenidos posteriormente al realizar ensayos de rodamientos en condiciones de prueba (con escasa grasa y exceso de grasa).

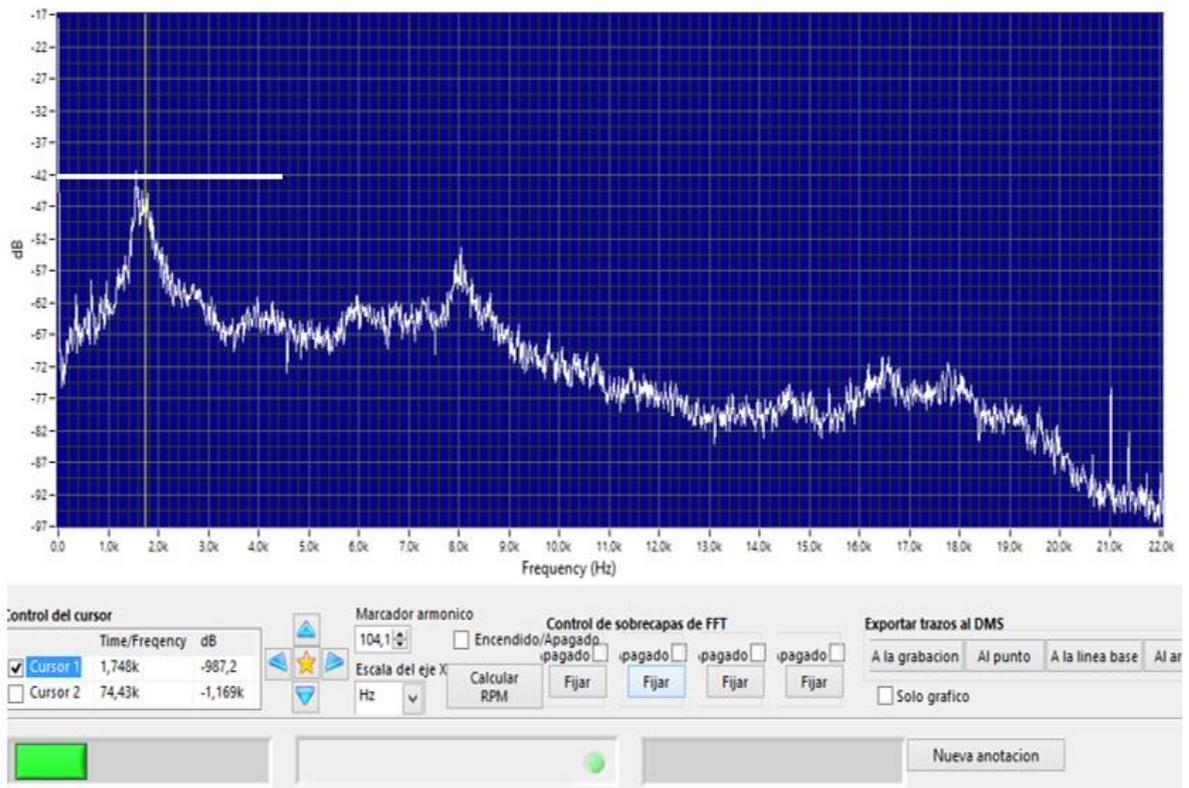


Figura 6-3: Medición tomada con el equipo de ultrasonido

Fuente: Autores.

Como se observa en la figura 6-3, la amplitud de la onda acústica está en niveles que no sobrepasa los -45 dB. Hay que mencionar, que un rodamiento nuevo no sobrepasa los -42 dB.

3.1.7. Cálculo de la carga equivalente para condiciones de lubricación diferentes

Para la realización de los ensayos en condiciones variables de lubricación y encontrar los tiempos en los que el rodamiento llegará a una falla incipiente, se procedió a encontrar su carga equivalente (C) a la que será sometida el rodamiento, su vida útil (L10) y la cantidad grasa para los ensayos.

Entonces, se comenzó calculando la vida útil (L10) mediante la ecuación (2), para las condiciones de lubricación a las que serán sometidos los rodamientos tomando en cuenta el valor de cuatro horas.

$$L_{10} = \left(\frac{C_r}{P_e}\right)^n \quad (2)$$

Para resolver la ecuación (13) se necesita conocer los ciclos, lo cual se realiza mediante la expresión (14).

$$f = \frac{\text{Ciclos}}{t} \quad (13)$$

De donde, se conoce que la frecuencia (f) es 60 hercios que proviene de la placa del motor y el tiempo (t) es cuatro horas, entonces aplicando estos datos a la ecuación (14) se tiene:

$$\text{Ciclos} = 60\text{Hz} * 4\text{h} * \frac{3600\text{ s}}{1\text{h}} = 864000$$

Con este resultado, se procede a calcular la vida útil (L₁₀) mediante la ecuación (13) resultando:

$$L_{10} = \frac{864000}{1000000} = 0,864$$

Entonces, con el valor de la vida útil se realiza el cálculo de la carga dinámica real mediante la expresión matemática (14).

$$P_e = \frac{C_r}{\sqrt[3]{L_{10}}} \quad (14)$$

De donde, Cr que es la carga radial es tomado de la tabla de datos técnicos del rodamiento 6206 expuestos en el capítulo III, referente a la selección del rodamiento. Entonces, la ecuación (14) da como resultado:

$$P_e = \frac{20300\text{N}}{\sqrt[3]{0,864}} = 21368,42\text{ N}$$

Con la carga calculada, se procedió a calcular la presión a ejercerse al rodamiento mediante la bomba hidráulica manual mediante la ecuación (15), el fin de realizar este proceso es la obtención de los tiempos de falla.

$$P = \frac{F}{A} \quad (15)$$

De donde: F es igual a P, que fue calculado anteriormente en [N] y A es el área.

El área será calculada mediante la expresión matemática (16)

$$A = \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4} - \frac{\pi \cdot d^2}{4} \right) \quad (16)$$

De donde: D es el diámetro mayor que es de 54 mm y d es el diámetro menor que tiene la medida de 32 mm, cuyos datos aplicados a la ecuación (17), resulta en:

$$A = (0,073^2 - 0,02^2) = 0,00387 \text{ m}^2$$

Con el valor del área hallado, se va a calcular la presión a inyectarse en la bomba hidráulica manual en la ecuación (16).

$$P = \frac{21368,4 \text{ N}}{0,00387 \text{ m}^2} = 5'521550,39 \text{ N/m}^2$$

Debido a que la bomba hidráulica presenta su escala en psi se necesita realizar una conversión de unidades de la presión obtenida.

$$\frac{5521550,39 \text{ N}}{1 \text{ m}^2} \times \frac{0.224809 \text{ lbf}}{1 \text{ N}} \times \frac{1 \text{ m}^2}{(39,37^2) \text{ in}^2} = 800,8 \text{ PSI}$$

Esta será la carga aplicada a las probetas de ensayo para calcular el tiempo promedio de 4 horas de vida del rodamiento 6206 en condiciones variables de lubricación.

3.1.8. Preparación de los elementos para las mediciones en condiciones anormales

El presente trabajo investigativo se aplicó a 10 rodamientos en condiciones de lubricación defectuosa y cinco en condiciones normales de lubricación. Con el fin de monitorear el tiempo en que un rodamiento va a fallar por defectos de lubricación. Para lo cual se realizaron la toma de mediciones en el banco de pruebas utilizando los equipos de ultrasonido y combinando con el equipo de análisis de vibración VIBRATECH, para de esta manera tener una información un más confiable en la toma de datos de la investigación.

3.1.9. Cambio de condiciones normales

Para cambiar las condiciones normales de lubricación de los rodamientos se procedió a calcular la cantidad de grasa ideal con que un rodamiento viene de fábrica según la ecuación (2) y (3) se obtuvo este dato, y la carga aplicada obtenida en la ecuación (15), para que falle el rodamiento en un tiempo estimado de cuatro horas. Obteniéndose los siguientes resultados

- Capacidad de carga dinámica radial de 21,3 kN que proviene del catálogo SKF.

- La presión aplicada al rodamiento para el trabajo de investigación es $5521550,39 \text{ N/m}^2$ que es equivalente $800,8 \text{ PSI}$

Para el pesado de la grasa se utilizó una balanza digital y un pedazo de papel aluminio.

- Peso de grasa para un rodamiento en condiciones escasa de lubricación = 1,87 gr de la grasa.
- Peso de la grasa para un rodamiento en condiciones de exceso de lubricante = 7,5 gr



Figura 7-3: Peso del lubricante
Fuente: Autores.

3.1.10. Limpieza del rodamiento para pruebas

Se realizó la limpieza de rodamientos utilizando una brocha y diésel, la figura 8-3 se presenta en el lado izquierdo como se realizó la limpieza del rodamiento y en la derecha se muestra un rodamiento limpio.



Figura 8-3: Limpieza del rodamiento
Fuente: Autores.

3.1.11. Condiciones de lubricación defectuosa

En la figura 9-3 se muestra en el lado izquierdo un rodamiento en condiciones de exceso y en el derecho se observa un rodamiento con escasa lubricación.



Figura 9-3: Condiciones de lubricación defectuosa
Fuente: Autores.

3.1.12. Toma de datos y monitoreo de rodamientos hasta la falla.

La toma de datos finales consta de tres condiciones:

3.1.12.1. Monitoreo de rodamientos con escasa lubricación

Se procedió al montaje de los rodamientos de prueba en condiciones de escasa lubricación, aplicándose una carga de 503800 Kg/m^2 (800,8 PSI), con una cantidad de lubricante del 50% que es equivalente a 1,75 gramos, obteniéndose tiempos en los cuales los rodamientos empezaron a tener fallas incipientes. Estos datos se encuentran en el Anexo D.

3.1.12.2. Monitoreo de rodamientos en condiciones normales

Se procede al montaje de los rodamientos de prueba en condiciones normales de lubricación y se aplica la carga de 503800 Kg/m^2 (800,8 PSI), con una cantidad de grasa del 100% que es equivalente a 3,5 gramos, obteniéndose tiempos en los cuales los rodamientos empezaron a tener fallas incipientes. Estos datos se encuentran en el Anexo E.

3.1.12.3. Monitoreo de rodamientos en condiciones de exceso de lubricante

Se procede al montaje de cada una de las unidades de prueba esta vez con exceso de lubricante (200% de grasa) 7 gramos y se le aplica las condiciones de carga radial de 503800 Kg/m^2 (800,8 PSI), obteniéndose tiempos en los cuales los rodamientos empezaron a tener fallas incipientes. Estos datos se encuentran en el Anexo F.

3.1.13. Caracterización de la falla incipiente

A continuación, en la figura 10-4 se muestra el espectro tomado del equipo de ultrasonido cuando el rodamiento entra en falla incipiente.



Figura 10-3: Medidor de vibraciones TPI 9070
Fuente: PCE.

Para conocer cuando el rodamiento se encuentra en estado de falla incipiente se utilizó la técnica de BDU, la cual consiste en el uso del equipo vibrómetro TPI 9080 inteligente que, de manera similar a los otros métodos de diagnóstico, primero se determina los ejes o puntos de medición, es decir, un punto de medición radial en el eje y que sea perpendicular a este. Además, se necesita la ubicación de un punto horizontal de prueba a 180 grados del eje de prueba y un punto axial de prueba que este paralelo al eje de prueba.

Determinados los puntos de medición, se procedió a definir los valores de referencia, para lo cual se iniciaron las pruebas, marcándose valores entre 20 a 24 BDU en el vibrómetro. De esta manera queda asignada la escala de falla, entonces se procede al monitoreo continuo cada 20 minutos del estado de la vibración del rodamiento.

Con el avance de las pruebas se observó que a las tres horas se realizaron 15 mediciones en cada punto de prueba, evidenciando un aumento del nivel del BDU a 30, por lo cual se ajusta la frecuencia de monitoreo a 15 minutos.

Al paso de cuatro horas se observó que, el nivel de daño del rodamiento es de 100 BDU, por lo tanto, para constatar la presencia de la falla incipiente se realizó pruebas de ultrasonido y mediciones del espectro característico que, a su vez, cuyos datos fueron representados en un análisis gráfico donde se evidencia la evolución de la falla.

Hay que mencionar que, la amplitud de ultrasonido de un rodamiento nuevo es de -42 dB, por lo cual este valor tomado como línea base para las mediciones realizadas en el presente trabajo de investigación.

La escala de diagnóstico de rodamientos que muestra el equipo TPI 9080 se muestra en la tabla 5-3.

Tabla 5-3: Escala de diagnóstico

Escala BDU	Color de la pantalla	Condición del rodamiento
0 – 50	Verde	Rodamiento en buenas condiciones
50 – 100	Amarillo	Alerta de inicio de falla
>100	Rojo	Estado de falla

Fuente: Autores

Realizado por: Autores



Figura 11-3: Pantalla del medidor de vibraciones TPI 9070

Fuente: PCE.

Para utilizar el medidor de vibraciones TPI 9080 se procedió a realizar los siguientes pasos:

1. Se selecciona el punto de medición en las direcciones vertical, horizontal y axial como se muestra en la figura 4-4.
2. Se conectó el transductor piezoeléctrico al equipo.



Figura 13-3: TPI 9070

Fuente: PCE.

3. Se coloca el transductor piezoeléctrico al punto de medición.
4. Se debe tomar en cuenta que el transductor piezoeléctrico debe quedar bien fijo en el punto de medición para lo cual se ha colocado bases de sujeción del transductor.
5. Se realiza la toma de datos en los tres ejes de medición.
6. La ubicación para realizar las lecturas debe proporcionar la seguridad e integridad del instrumentista pues se realiza el ensayo con el módulo a alta velocidad de operación.



Figura 14-3: Colocación en el punto de medición
Fuente: PCE.

7. Se monitorea cada 20 minutos, para lo cual determinó que la amplitud de -25 dB fue la línea base en la cual se basa el presente estudio para determinar la condición de fallo incipiente del rodamiento, por lo tanto, desde este punto se empezaron a tomar las mediciones del tiempo de vida.
8. Cuando el rodamiento es nuevo la amplitud del ultrasonido es apenas de -42 dB como se presenta en la figura 12-4, mientras que cuando el rodamiento supera los 100 BDU con el vibrómetro, se observó que la señal del ultrasonido se incrementó a -25 dB presentándose la falla incipiente como se muestra en la figura 13-3.

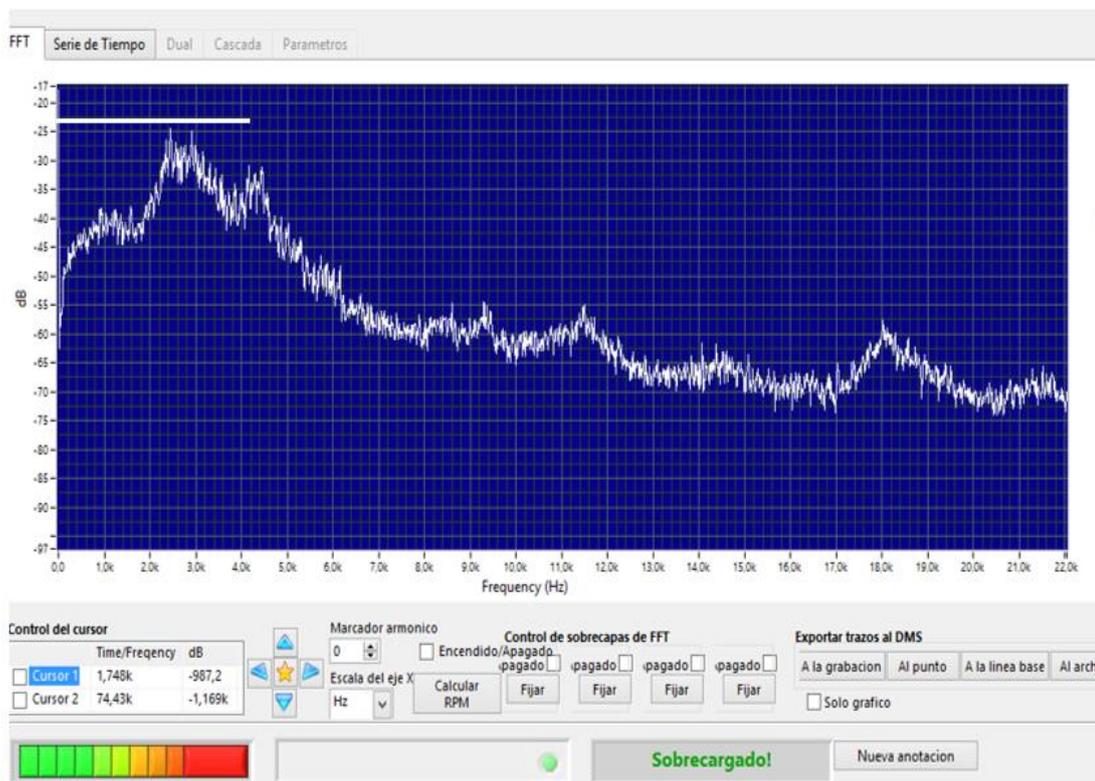


Figura 15-3: Valores normales de BDU
Fuente: PCE.



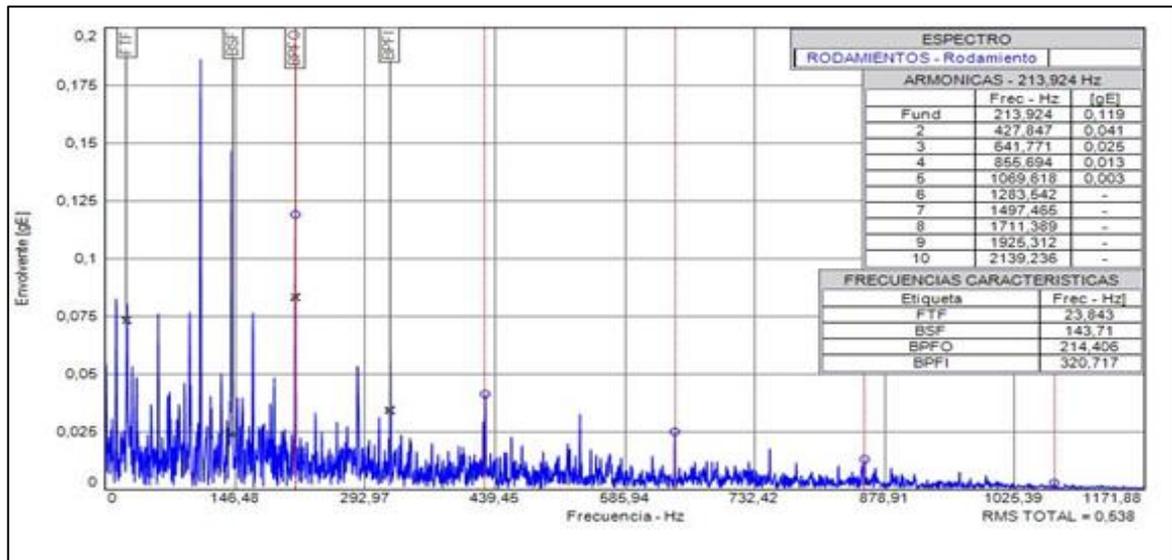
Figura 16-3: Valores de falla de BDU
Fuente: PCE.

A continuación, en el gráfico 1-3, se muestra el espectro tomado del equipo de ultrasonido cuando el rodamiento entra en falla incipiente.



Gráfica 1-3: Medición tomada en condiciones de falla del rodamiento.
Fuente: Autores. Es gráfico

Para verificar el estado de falla incipiente en los rodamientos, se tomó una medición espectral de la envolvente de la vibración, la cual se muestra en la gráfica 2-3.



Gráfica 2-3: Medición tomada en condiciones de falla del rodamiento.
Fuente: MainTraq

3.2. Resultados y Análisis

En la tabla 5-3, se tabulan los resultados de las mediciones del tiempo mediante el equipo de ultrasonido, donde se evidenció que los rodamientos se encontraban en estado de falla incipiente. El procesamiento de los datos se realizó en el software estadístico R, cuyas líneas de código se encuentran en el Anexo G.

Tabla 5-3: Tiempo de vida de los rodamientos

Nº	Tiempo con escasez de grasa [h]	Tiempo con la cantidad normal de grasa [h]	Tiempo con exceso de grasa[h]
1	2,64	4,08	1,68
2	2,88	4,08	1,68
3	2,64	4,32	1,92
4	2,88	3,84	1,68
5	2,88	4,08	1,68

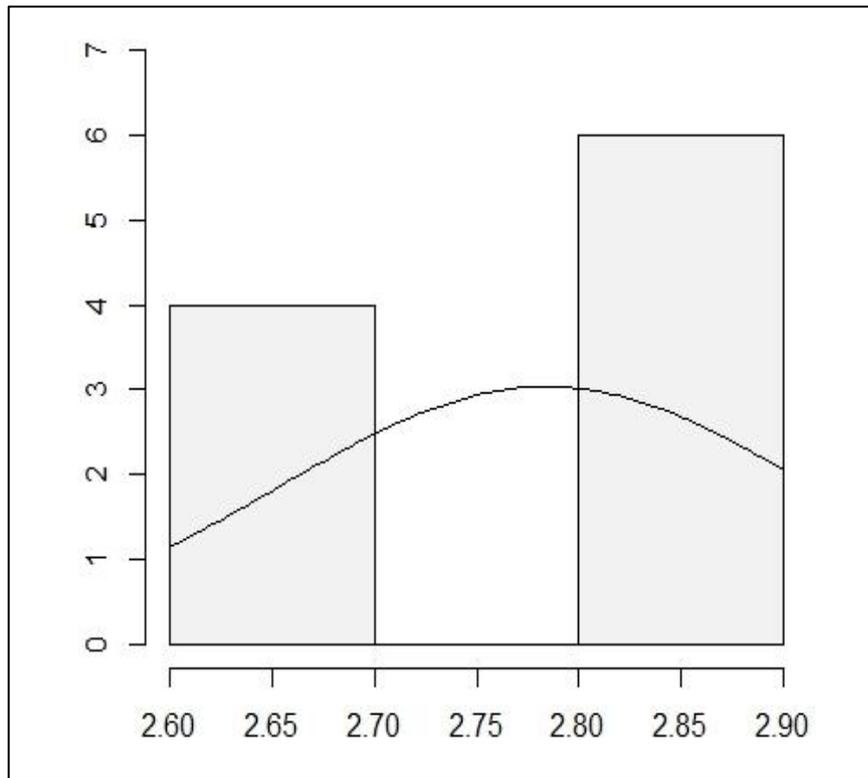
Fuente: Autores
Realizado por: Autores

Los resultados del análisis estadístico de los datos en la tabla 5-3, se observa en la tabla 6-3, cuyos respectivos histogramas de frecuencias están ilustrados en las gráficas 3-3,4-3 y 5-4.

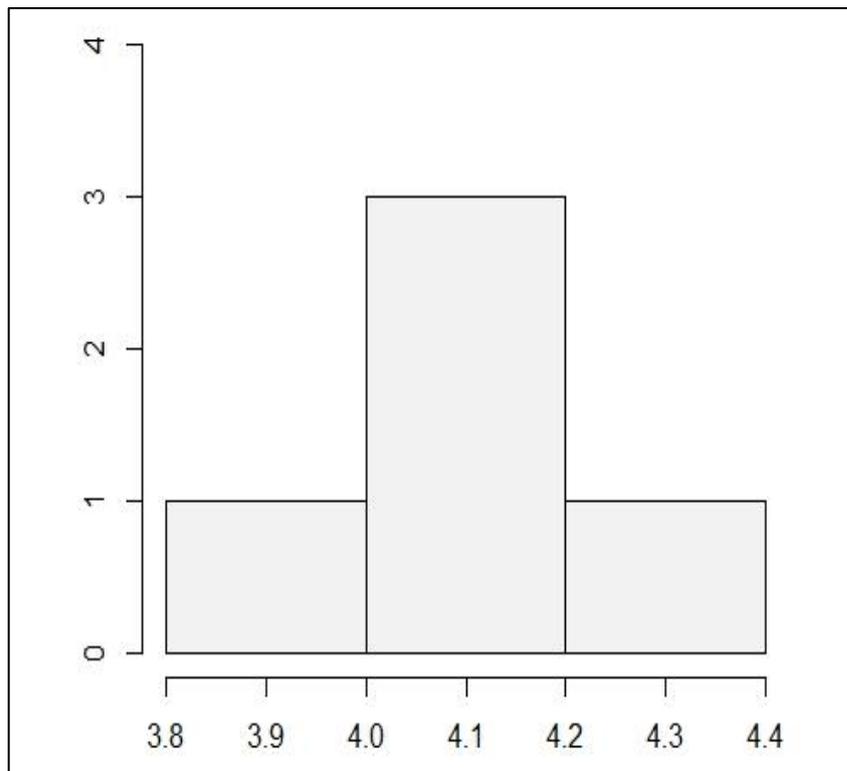
Tabla 6-4: Estadística de los tiempos de falla

Variable	Mínimo [h]	Máximo [h]	Media [h]	Desviación estándar
Tiempo con escasez de grasa	2,640	2,880	2,784	0,1314534
Tiempo con la cantidad normal de grasa	3,84	4,32	4,08	0,1697056
Tiempo con exceso de grasa	1,680	1,920	1,728	0,1073313

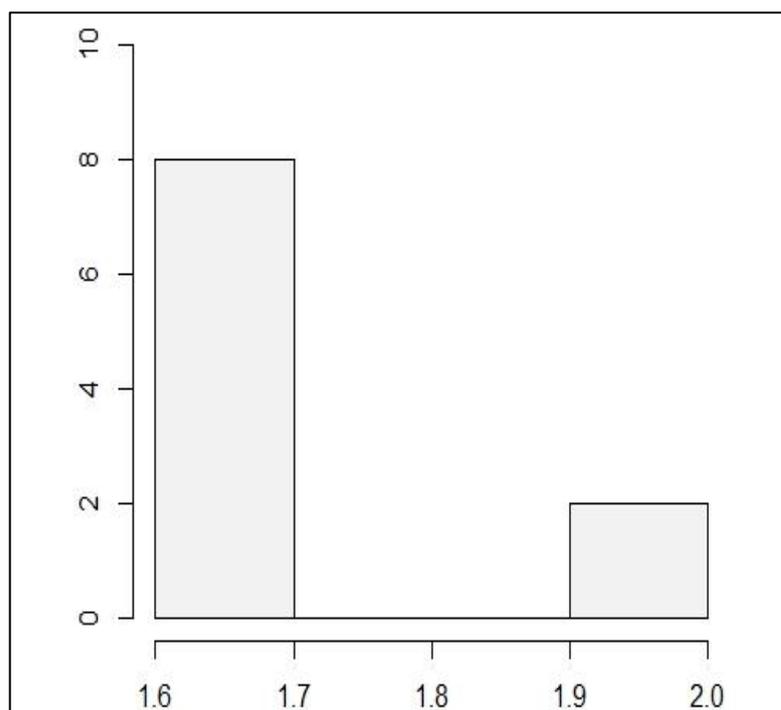
Fuente: Autores
Realizado por: Autores



Gráfica 3-3: Histograma de los tiempos de vida con escasez de grasa
Fuente: R Studio



Gráfica 4-3: Histograma de los tiempos de vida con cantidad normal de grasa
Fuente: R Studio



Gráfica 5-3: Histograma de los tiempos de vida con exceso de grasa
Fuente: R Studio

Para hallar el método de comparación de las muestras entre paramétrico o no paramétricos, es imprescindible realizar en los datos, una prueba de normalidad; para tal propósito, se eligió el método de Shapiro-Wilk, por ser eficaz y uno de los más utilizados, cuyos resultados generados con el software estadístico R, se muestran en la tabla 7-4.

Tabla 7-3: Evaluación de normalidad con la prueba Shapiro-Wilk

Variable	W	P-valor	Normalidad
Tiempo con escasez de grasa	0,68403	0,00647	No
Tiempo con la cantidad normal de grasa	0,88349	0,32540	Si
Tiempo con exceso de grasa	0,55218	0,00013	No

Fuente: Autores

Realizado por: Autores

Se observa que, no todas las muestras tienen un p-valor mayor a 0.05, entonces se concluye que los datos no se distribuyen normalmente a una confianza del 95%; por tal motivo, se selecciona el método de comparación de muestras no paramétrico de Wilcoxon Mann Whitney, cuyos resultados obtenidos con el software estadístico R, se indican en la tabla.8-3.

Tabla 8-3: Comparación de variables con la prueba de Wilcoxon Mann Whytney

Variable	W	P-valor
Tiempo de vida con la cantidad normal - escasez de grasa	0	0,009937
Tiempo de vida con la cantidad normal - exceso de grasa	25	0,008784

Fuente: Autores

Realizado por: Autores

Para comparar, si los tiempos de vida de los rodamientos con la cantidad normal de grasa corresponden a los de escasez de grasa; se establece que, la hipótesis nula (H_0) corresponde a la

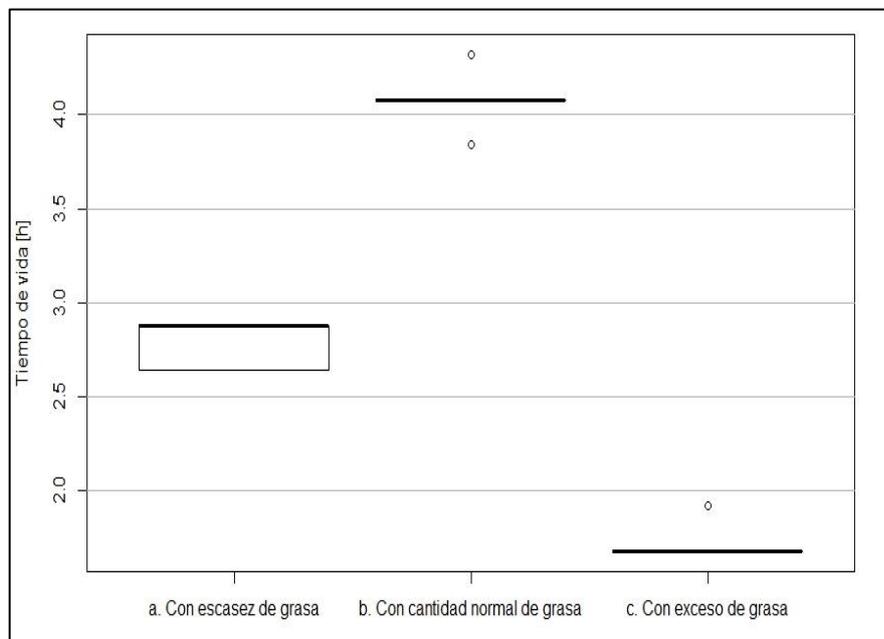
igualdad de las muestras, que indica que los tiempos de vida de los rodamientos con poco lubricante y cantidad normal, son iguales.

Como el p-valor obtenido con la prueba de Wilcoxon Mann Whitney es menor que 0,01 (ver Tabla 8-4); se rechaza la H_0 y se concluye que las muestras son diferentes con el 99% de confianza; por consecuencia y de acuerdo con la figura 8-4; los rodamientos con poca grasa alcanzan la falla incipiente en menor tiempo que los rodamientos con la cantidad normal de lubricante.

Mientras que, para la comparación de los tiempos de vida entre los rodamientos con la cantidad de grasa normal y los que tienen exceso de grasa; se define la hipótesis nula (H_0) como la igualdad de las muestras, que indica que las dos cantidades de grasa proporcionan el mismo tiempo de vida.

Como el p-valor obtenido con la prueba de Wilcoxon Mann Whitney es menor que 0,01 (ver Tabla 8-4); se rechaza la H_0 y se concluye que las muestras son diferentes con el 99% de confianza; por este motivo y en función del diagrama de cajas de la figura 8-4; se evidencia que, los rodamientos con exceso de grasa alcanzan la falla incipiente en menor tiempo que los rodamientos con la cantidad normal de lubricante.

En la gráfica 6-3, se muestra una comparativa de las variables mediante un diagrama de cajas.



Gráfica 6-3:: Comparación de las variables mediante diagrama de cajas

Fuente: R Studio

Entonces, mediante el software estadístico R que con el uso de su librería Renext, se obtiene los parámetros de forma y escala de Weibull, por medio del método de máxima verosimilitud. Estos resultados se indican en la tabla 9-3, mismos que indican un elevado parámetro de forma.

Tabla 9-3: Parámetros de Weibull de los tiempos de vida

Variable	Parámetro de forma	Parámetro de escala [h]
Tiempo con escasez de grasa	31,910698	2,837878
Tiempo con la cantidad normal de grasa	28,723480	4,153319
Tiempo con exceso de grasa	15,810140	1,778040

Fuente: Autores

Realizado por: Autores

Una vez encontrados los parámetros de forma y escala; se procedió a verificar si los tiempos encontrados se distribuyen de acuerdo con Weibull; para lo cual, se recurrió a la prueba estadística de Kolmogorov-Smirnov, obteniendo los resultados de la tabla 10-3.

Tabla 10-3: Prueba de Kolmogorov-Smirnov

Variable	D	P-valor
Tiempo con escasez de grasa	0,39815	0,4063
Tiempo con la cantidad normal de grasa	0,34906	0,5761
Tiempo con exceso de grasa	0,46504	0,2297

Fuente: Autores

Realizado por: Autores

Como el p-valor de los resultados de la tabla 10-4 son mayores que 0,05, se concluye que los tiempos de vida de la tabla 5-3, se asemejan a la distribución de Weibull con una confianza del 95%.

CONCLUSIONES

Se construyó un simulador de pruebas para el análisis del tiempo de falla por lubricación en los rodamientos, que tuvo varias propuestas de mejora que al final, contaron con cinco sistemas que son: el sistema de potencia que está conformado por un motor; el sistema de transmisión que está compuesto de un eje, chumaceras y rodamientos; el sistema de pruebas que tiene un porta rodamientos; el sistema eléctrico que posee un interruptor, indicador, variador de frecuencia, interruptor de emergencia y un tablero eléctrico, y el ultimo sistema es hidráulico que consta de una bomba hidráulica manual a la cual se adaptó un válvula de seguridad y un manómetro. Finalmente se realizó el montaje de todos los sistemas en una mesa construida para este fin.

Para determinar las características de las fallas incipientes de los rodamientos fue necesario calcular primero la cantidad de grasa a ser suministrada, luego se determinó el tipo de lubricante mediante una gráfica que relaciona el diámetro medio del rodamiento, velocidad de funcionamiento, temperatura ambiente y de operación. Posteriormente se determinó la carga equivalente a ejercerse en los ensayos que fueron de 800,8 psi. Finalmente, se realizó las pruebas en condiciones normales determinándose valores base: menores a -47 dB para ultrasonido y 0 – 50 BDU para el vibrómetro; se fijaron valores para condiciones de alarma que son: entre -25 y -47 dB para ultrasonido y 50 – 100 BDU para mediciones con el vibrómetro y los valores de falla son mayor a -25 dB para ultrasonido y mayores a 100 BDU para mediciones con vibrómetro.

Para determinar la relación entre la cantidad de lubricación y la vida útil del rodamiento, se definieron tres condiciones para los ensayos, la primera fue cuando el rodamiento posee escasa lubricación (50%), la segunda fue cuando el rodamiento tiene una lubricación normal (100%) y la última fue cuando el rodamiento posee una excesiva cantidad de lubricación (200%).

La verificación de la hipótesis planteada se realizó mediante la aplicación de varios test para observar si los datos obtenidos se ajustaban a una distribución normal mediante el uso del software R, en primera instancia se utilizó el test de normalidad paramétrico de Shapiro-Wilk , de lo cual, las condiciones con exceso y escasez de lubricante no superaron este test debido a que obtuvieron valores de 0,00013 y 0,006 respectivamente, que están debajo del valor del 5% o 0,05 para superar esta prueba. Entonces se realizó un segundo test no paramétrico de Wilcoxon-Man Whitney, de lo cual se concluye que, los tiempos en los cuales fallan los rodamientos en las tres condiciones son diferentes; siendo para la condición de escaso lubricante de 2,83 horas, para la condición de lubricante normal de 4,15 horas y para la condición de exceso de lubricante fue de 1,77 horas. Además, se determinó los parámetros de Weibull mediante método de máxima verosimilitud, los

cuales fueron constatados mediante una prueba de ajuste bondad de datos de Kolmogorov-Smirnov, de donde se determinó que los datos obtenidos se ajustan a la distribución de Weibull con una confiabilidad del 95%.

RECOMENDACIONES

Para este tipo de pruebas debido a el excesivo ruido debe utilizar siempre un equipo de protección auricular para evitar daños en nuestra salud

Como recomendación debemos decir que el equipo previamente antes de realizar un trabajo de investigación debe estar alineado para una correcta ejecución en la toma de datos.

El eje debe ser de una calidad mayor debido a que las cargas utilizadas causan un deterioro continuo y rápido.

Se recomienda siempre trabajar en cada ensayo a las mismas condiciones operativas en cada probeta para así obtener resultados eficaces de investigación.

Es necesario, que la máquina de las facilidades para la alineación e intercambio de los elementos de prueba.

El presente trabajo abre la posibilidad de realizar trabajos futuros como la determinación de la vida útil del lubricante y cálculo de tiempos de re-lubricación en base a espectros ultrasónicos.

Otro trabajo de investigación que se podría desarrollar es la determinación de los parámetros de lubricación en base al análisis ultrasónico y posterior, evaluación el análisis de vibraciones.

Se recomienda realizar el estudio de los diferentes modos de falla mediante la variación de la velocidad, condiciones de carga, cantidad de lubricante y tipos de rodamientos.

GLOSARIO

Análisis espectral: se utiliza más comúnmente para monitorear la condición de máquinas. La vibración en máquinas es provocada por fuerzas de excitación cíclicas que se originan por desbalances, desgaste o avería de las partes. (Rao 2012)

Carga radial: es una medida de la potencia de un rodamiento solicitado dinámicamente. Se define como la carga que actúa sobre los rodamientos que giran y bajo la cual, el 90% de rodamientos iguales, funcionando a iguales condiciones de servicios alcanzan un tiempo de funcionamiento de 1 millón de revoluciones antes de falla a causa de fatiga. (Cortizo 2003; pp. 99)

Confiabilidad: capacidad de un elemento de desarrollar una función requerida bajo unas condiciones dadas durante un intervalo de tiempo determinado. (UNE-EN:13306 2013; pp. 7)

Falla incipiente: es una condición identificable que indica que una falla funcional está a punto de ocurrir o está en proceso de ocurrir. (SAE JA 1011 1999)

Hipótesis nula: la hipótesis nula formula un planteamiento de que no existe relación entre las variables consideradas. Por lo general cuando se plantea una hipótesis nula se espera que sea rechazada. (Del Carpio 2013)

Motor asincrónico: es el motor en el cual cuya parte móvil (rotor) gira a una velocidad distinta a la de sincronismo o de estator. (Castillo 2015; pp. 228)

Tiempo de falla: duración total del tiempo de operación de un elemento, desde el instante en que se encuentra por primera vez en estado de disponibilidad hasta la aparición del fallo, o desde el instante de restablecimiento hasta la aparición del próximo fallo. (UNE-EN:13306 2013; pp. 21)

Torque nominal: es la fuerza de empuje que va a tener el eje de salida, dato independiente del tiempo que tarde en ejercer esa fuerza. (CLR 2017)

Troquel: es un útil que se monta sobre una prensa (mecánica, neumática, etc.) que ejerce una fuerza sobre sus elementos, provocando que la pieza superior encaje sobre la inferior o matriz. (Chávez 2008)

Transductor: es un dispositivo que transforma los cambios de cantidades mecánicas (desplazamiento, velocidad, aceleración o fuerza) en cambios de cantidades eléctricas (voltaje o

corriente. Como la señal de salida (voltaje o corriente) de un transductor es muy débil para ser registrada de forma directa, se utiliza un instrumento de conversión de señales para amplificar al valor requerido. (Aldaz 2015; pp. 34)

Vibrómetro: son instrumentos que miden el desplazamiento de un cuerpo vibratorio. La medición en sí misma aporta los siguientes parámetros: aceleración de vibración, velocidad de vibración y desviación de vibración. Estas magnitudes caracterizan la oscilación exactamente. El vibrómetro es portátil, los resultados pueden almacenarse parcialmente. (Rao 2012)

Vida útil: el intervalo de tiempo que bajo unas condiciones dadas comienza en un instante de tiempo determinado y termina cuando la tasa de fallos se hace inaceptable, o bien cuando el elemento se considera irreparable como resultado de una avería o bien de otros factores relevantes. (UNE-EN: 13306 2013; pp. 8)

BIBLIOGRAFÍA

AGUILLON, A.; & PINZÓN, M. “Cálculo del ahorro de energía por menor fricción”. *Dyna* [en línea], 2006, vol. 71, no 144, p. 137-149. [Consulta: 12 enero 2020]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/496/49614415.pdf>

ARANZABE, E; & MÁLAGA, A. *Grasas lubricantes* [en línea]. Lubrication Management. Del Grupo IK4.TEKNIKER. España. 2016. [Consulta: 15 enero 2020]. Disponible en: <https://www.lubrication-management.com/>

GARCÍA GARRIDO, S. *Técnicas de mantenimiento condicional basadas en la condición de variables físicas* [en línea]. Renovetec 2009. [Consulta: 20 enero 2020]. Disponible en: http://www.renovetec.com/irim/revista/REVISTA_IRIM_NUMERO10_%20MTO%20BASADO%20EN%20CONDICION.pdf

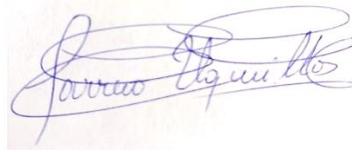
OTEGUI, J. *Análisis de fallo: Fundamentos y aplicaciones en componentes mecánicos* [en línea]. Springer Science & Business Media. 2009. [Consulta: 20 enero 2020]. Disponible en: https://books.google.com.ec/books/about/Failure_Analysis.html?id=Qtm4BAAAQBAJ&source=kp_cover&redir_esc=y

MONTALVO LIMA, Diego Armando, & VACA ORTEGA, Wilson Henry. Análisis de medios lubricantes de los rodamientos 6202 y nj202e. Typ2 y su incidencia en la velocidad de desgaste. (Trabajo de titulación).(Ingeniería). Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Carrera de Ingeniería Mecánica. 2013. [en línea]. [Consulta: 20 enero 2020]. Disponible en: <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/6504>

SALDAÑA, M. “Pruebas de bondad de ajuste a una distribución normal”. *Revista Enfermería del trabajo* [en línea]., 2016, vol. 6, no 3, p. 114. [Consulta: 15 febrero 2020]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5633043>

SIEMENS, *Manual Service Handbook, General Service Information for standard Low-Voltage Motors.* Version v1.1, 2005

SHIGLEY, J. *Manual de diseño mecánico* [en línea]. McGraw-Hill. 1989. [Consulta: 15 febrero 2020]. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=3BqbKAAACAAJ&dq=manual+de+dise%C3%B1o+mecanico+shigley&hl=es419&sa=X&ved=0ahUKEwj0qYzN3oTqAhV9oHIEHfkgAaIQ6AEIJzAA>

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Javier Aguilar".

20-08-2020

0124-DBRAI-UPT-2020

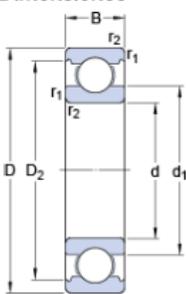
ANEXOS

ANEXO A: CATALOGO SKF

6206

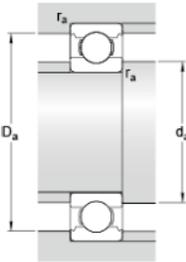
Producto popular
SKF Explorer

Dimensiones



d	30	mm
D	62	mm
B	16	mm
d_1	\approx 40.36	mm
D_2	\approx 54.06	mm
$r_{1,2}$	min. 1	mm

Dimensiones de los resaltes



d_a	min. 35.6	mm
D_a	max. 56.4	mm
r_a	max. 1	mm

Datos del cálculo

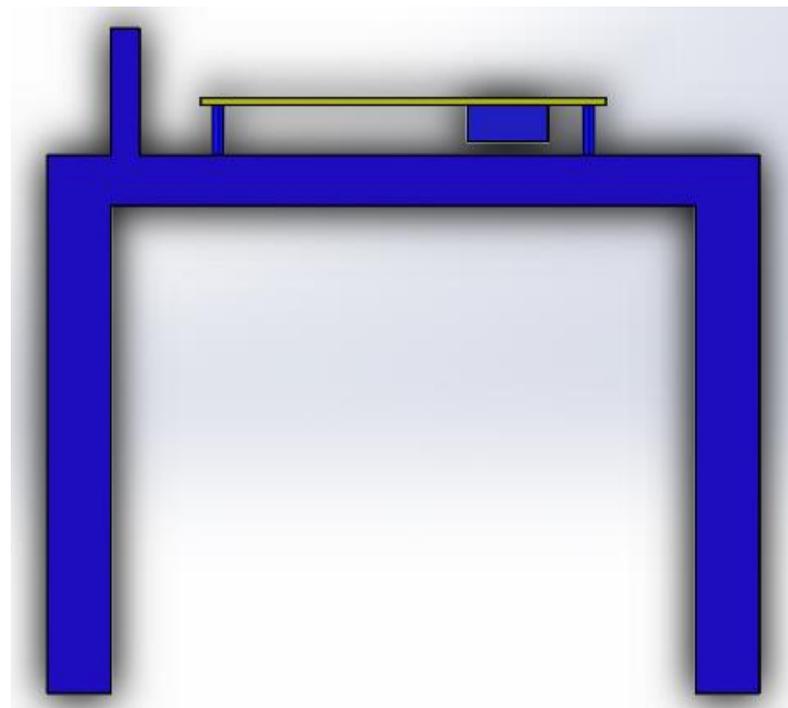
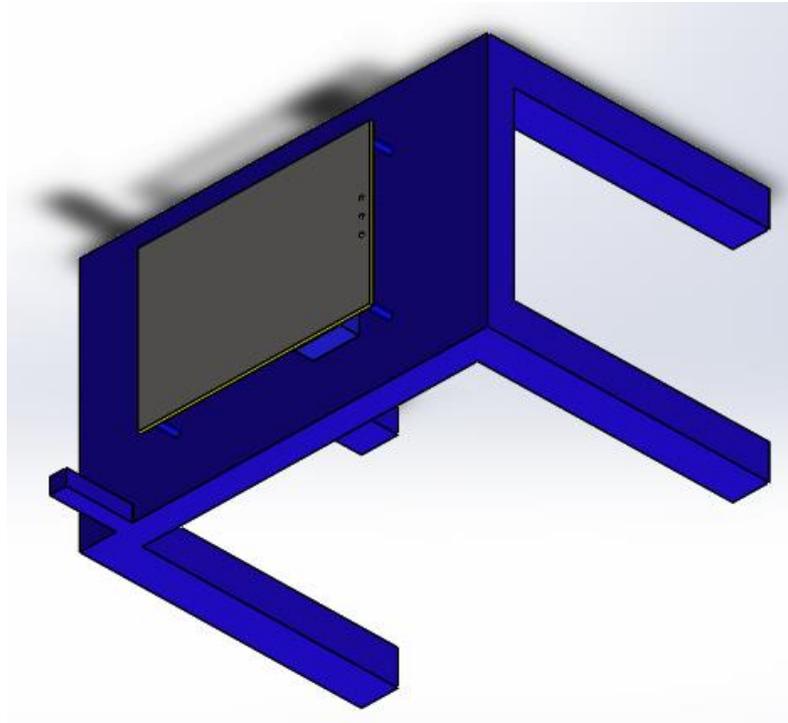
Capacidad de carga dinámica básica	C	20.3	kN
Capacidad de carga estática básica	C_0	11.2	kN
Carga límite de fatiga	P_u	0.475	kN
Velocidad de referencia		24000	r/min
Velocidad límite		15000	r/min
Factor de cálculo	k_r	0.025	
Factor de cálculo	f_0	14	

Masa

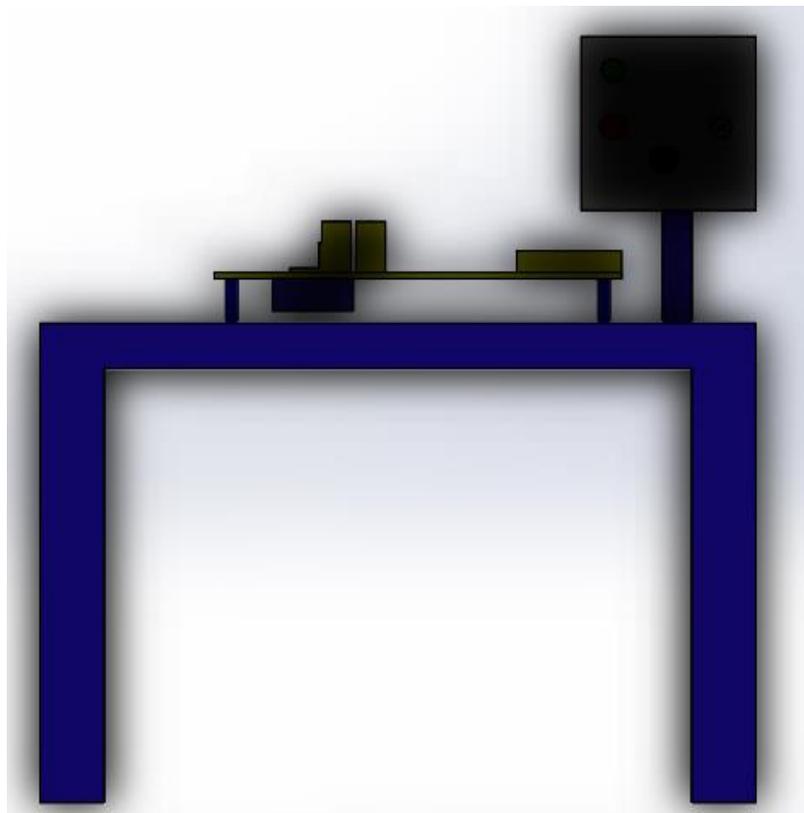
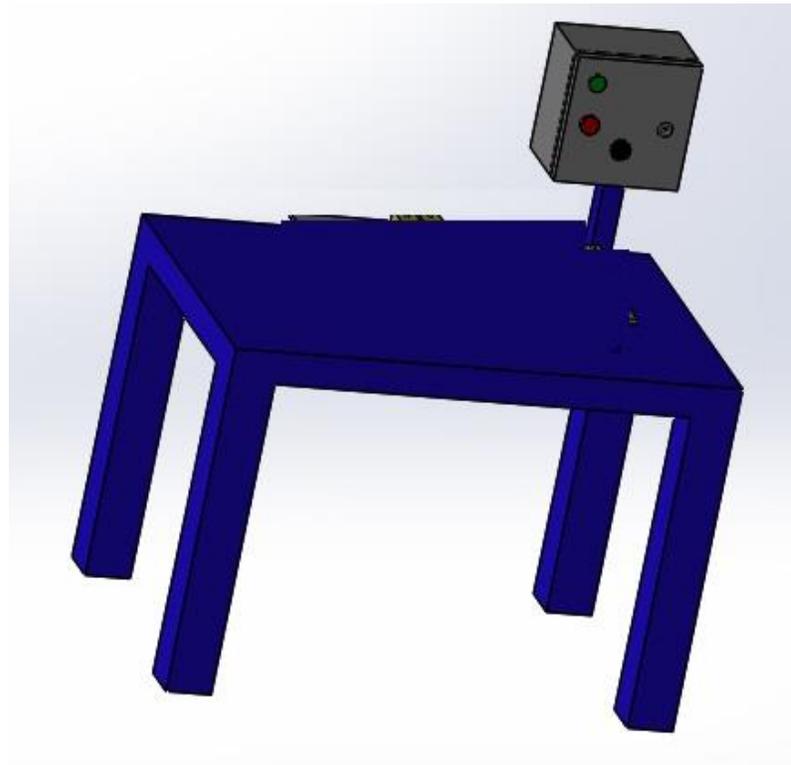
Rodamiento de masa	0.2	kg
--------------------	-----	----

ANEXO B: DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS

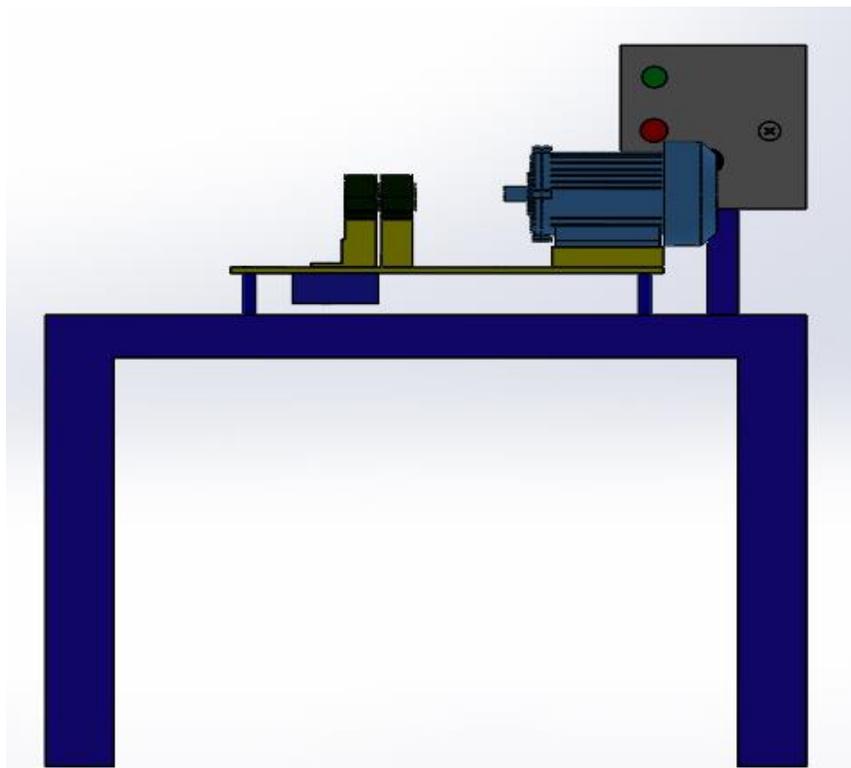
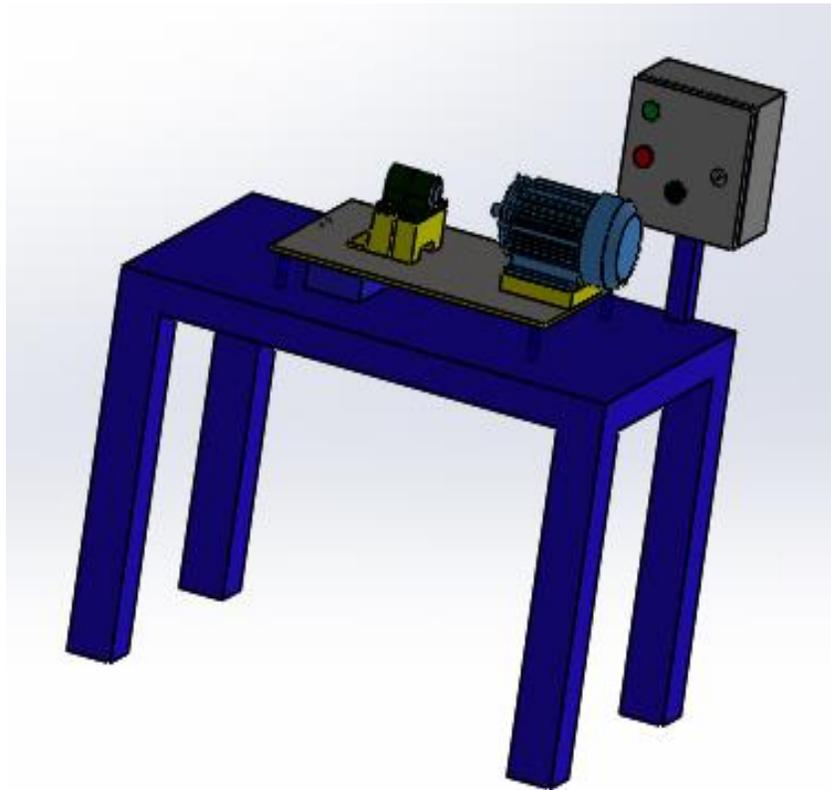
Construcción de la mesa y placas base



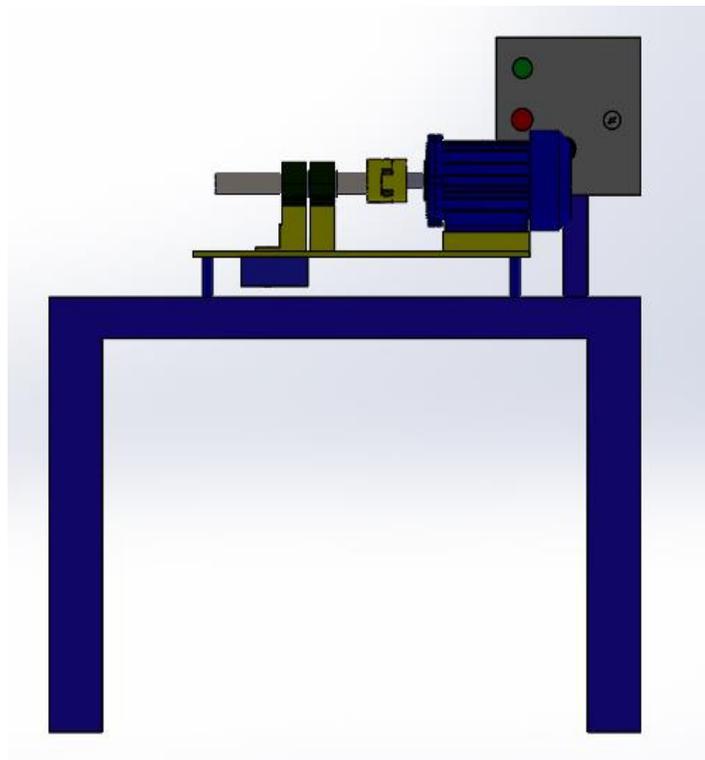
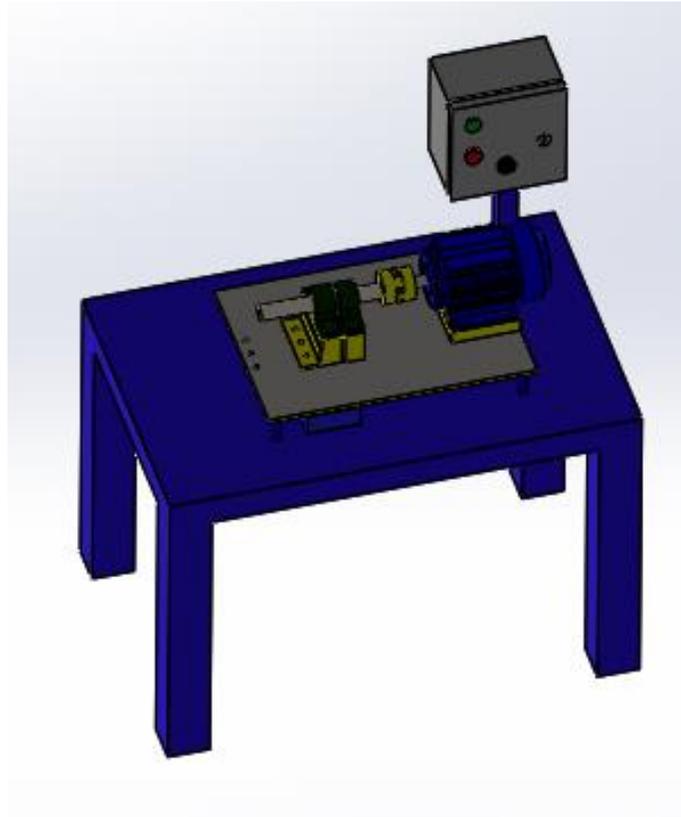
Colocación del tablero eléctrico



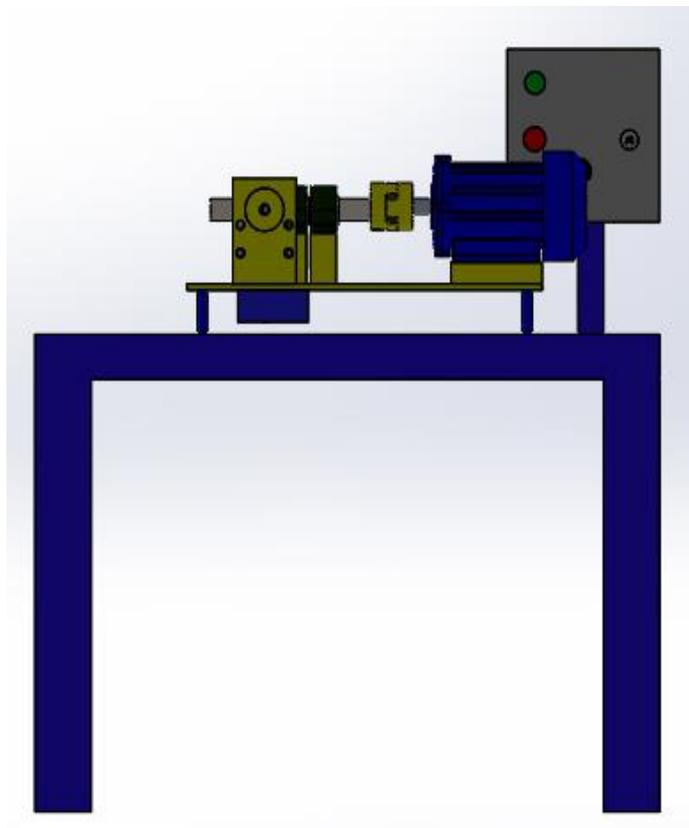
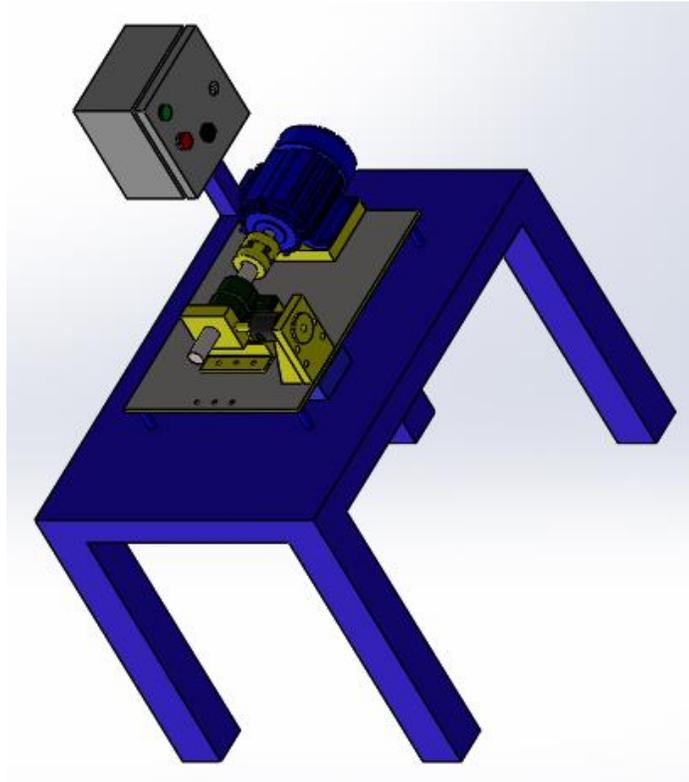
Montaje del motor



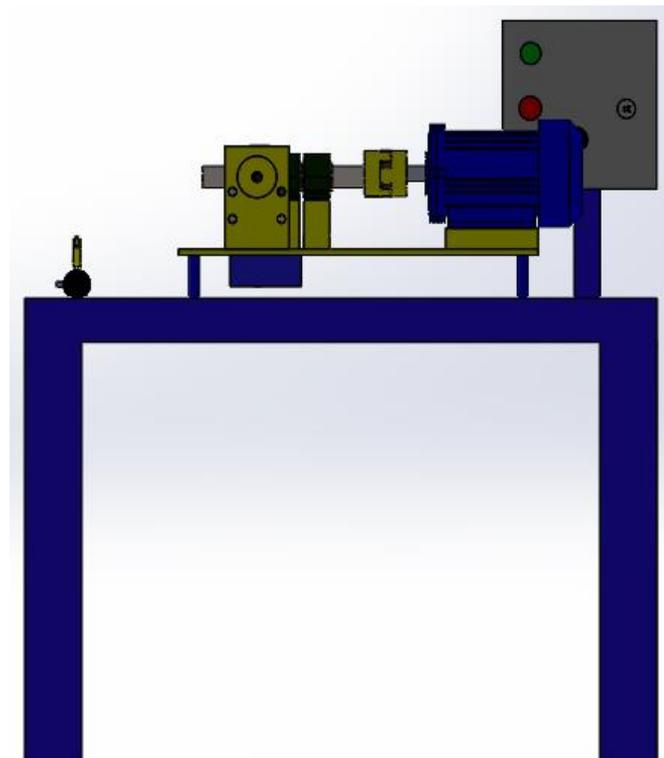
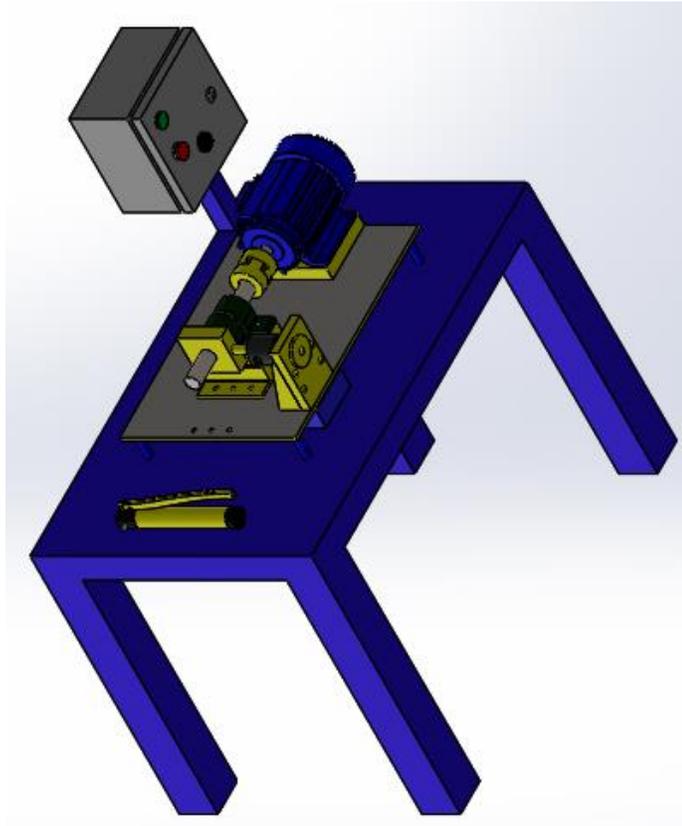
Montaje del eje y acople flexible



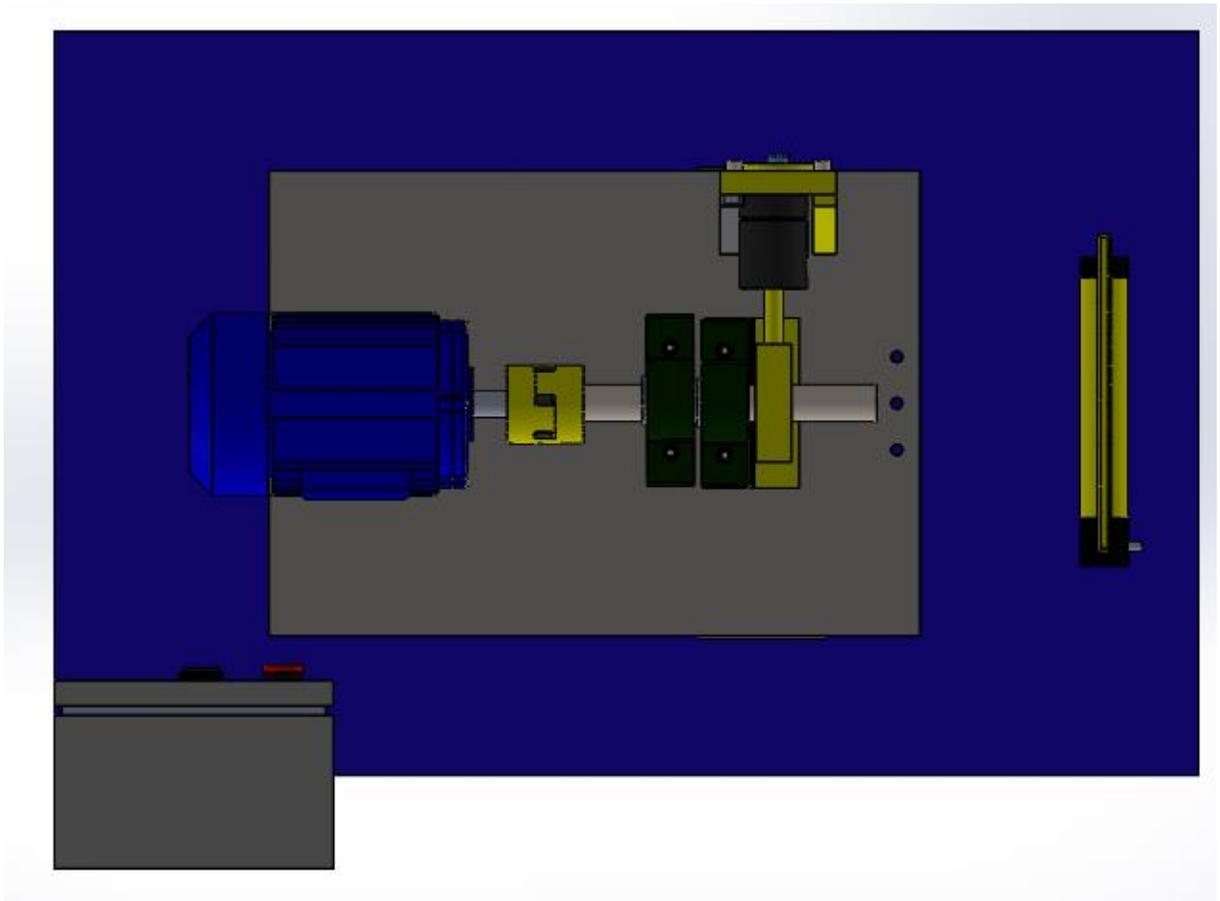
Montaje del porta rodamientos y chumaceras



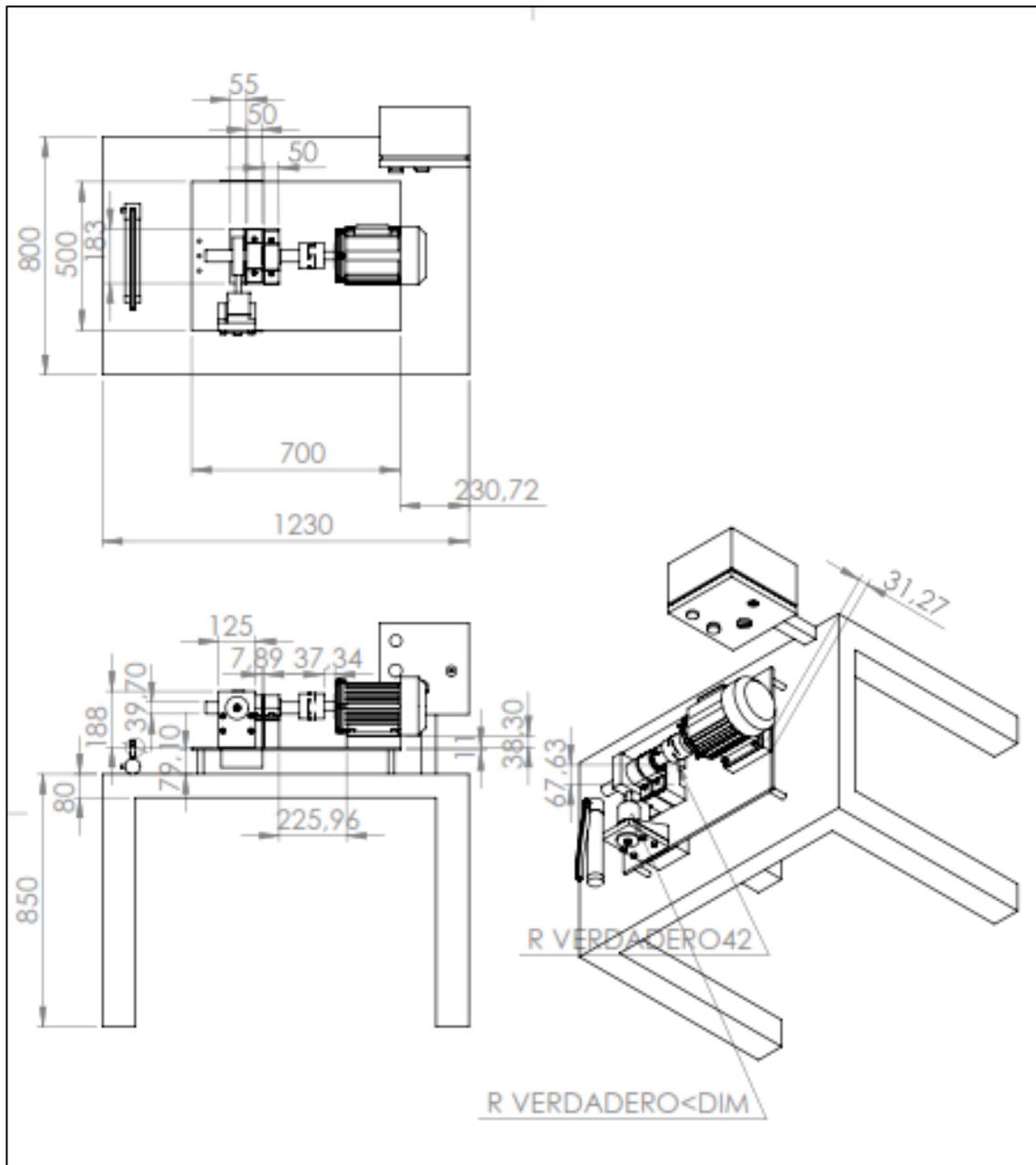
Montaje del sistema hidráulico



Montaje total



ANEXO C: PLANO DEL MÓDULO DE ENSAYOS



ANEXO G: PROGRAMACIÓN PARA LOS CÁLCULOS ESTADÍSTICOS EN R STUDIO

```
t1=c (2.64,2.88,2.64,2.88,2.88) # grasa con escasez
```

```
t2=c (4.08,4.08,4.32,3.84,4.08) # cantidad normal de grasa
```

```
t3=c (1.68,1.68,1.92,1.68,1.68) # grasa en exceso
```

```
#
```

```
summary(t1); sd(t1)
```

```
summary(t2); sd(t2)
```

```
summary(t3); sd(t3)
```

```
#
```

```
shapiro.test(t1)
```

```
shapiro.test(t2)
```

```
shapiro.test(t3)
```

```
#
```

```
hist (t1, breaks=2, cex.lab=1.2, ylim=c (0,7), main="", xlab="", ylab="", col="gray95", freq=F)
```

```
x=seq(min(t1), max(t1), by=1)
```

```
curve (dnorm (x, mean(t1), sd(t1)), add=T)
```

```
hist (t2, breaks=2, cex.lab=1.2, ylim=c (0,4), main="", xlab="", ylab="", col="gray95", freq=F)
```

```
x=seq(min(t1), max(t1), by=1)
```

```
curve (dnorm (x, mean(t1), sd(t1)), add=T)
```

```

hist (t3, breaks=2, cex.lab=1.2, ylim=c (0,10), main="", xlab="", ylab="", col="gray95", freq=F)

x=seq(min(t1), max(t1), by=1)

curve (dnorm(x, mean(t1),sd(t1)),add=T)

#

boxplot(t1,t2,t3,names=c("a. Con escasez de grasa","b. Con cantidad normal de grasa","c. Con exceso
de grasa"),

      xlab="",ylab="Tiempo de vida [h]")

abline(h=c(2,2.5,3,3.5,4,4.5,5,5.5,6,6.5,7),col=gray(0.7))

#

wilcox.test(t1,t2,alternative="two.sided",conf.level=0.99)

wilcox.test(t2,t3,alternative="two.sided",conf.level=0.99)

#

#      Weibull

library(Renext)

fweibull(t1);fweibull(t2);fweibull(t3) # Parámetros por máxima verosimilitud

#

Beta1=31.910698;Alpha1=2.837878;Beta2=28.723480;Alpha2=4.153319;Beta3=15.81014;Alpha3
=1.77804

#

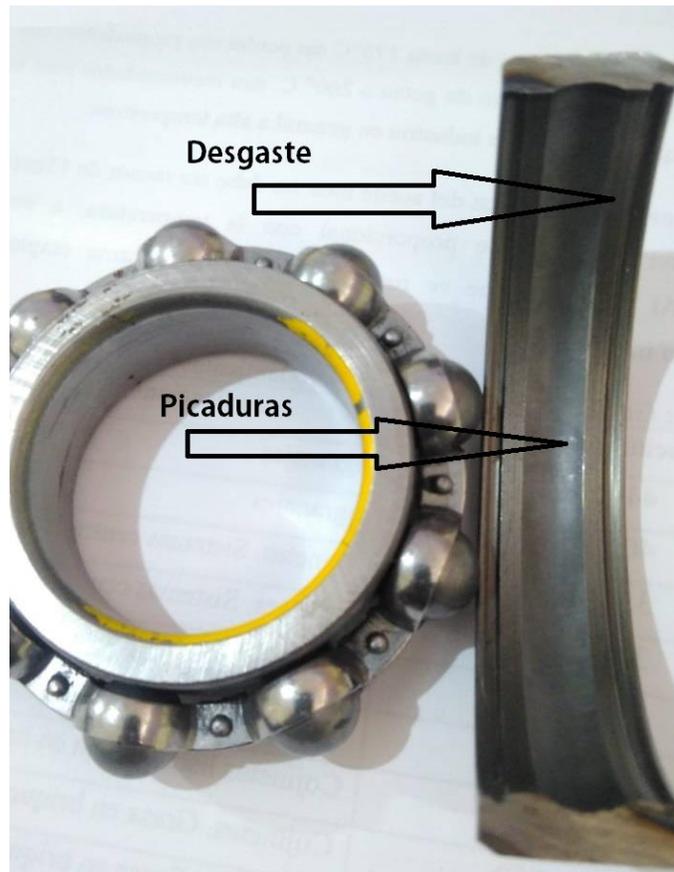
ks.test(t1,"pweibull",scale=Alpha1,shape=Beta1) # One-sample Kolmogorov-Smirnov test

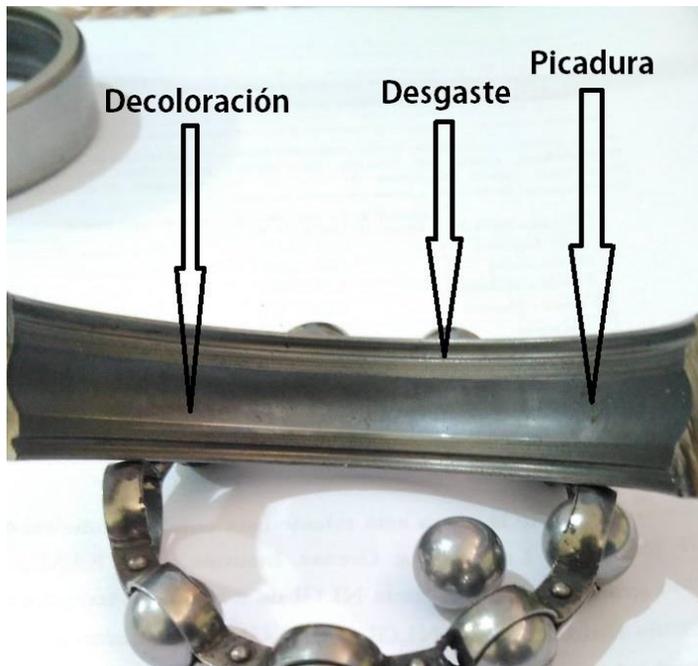
ks.test(t2,"pweibull",scale=Alpha2,shape=Beta2) # One-sample Kolmogorov-Smirnov test

```

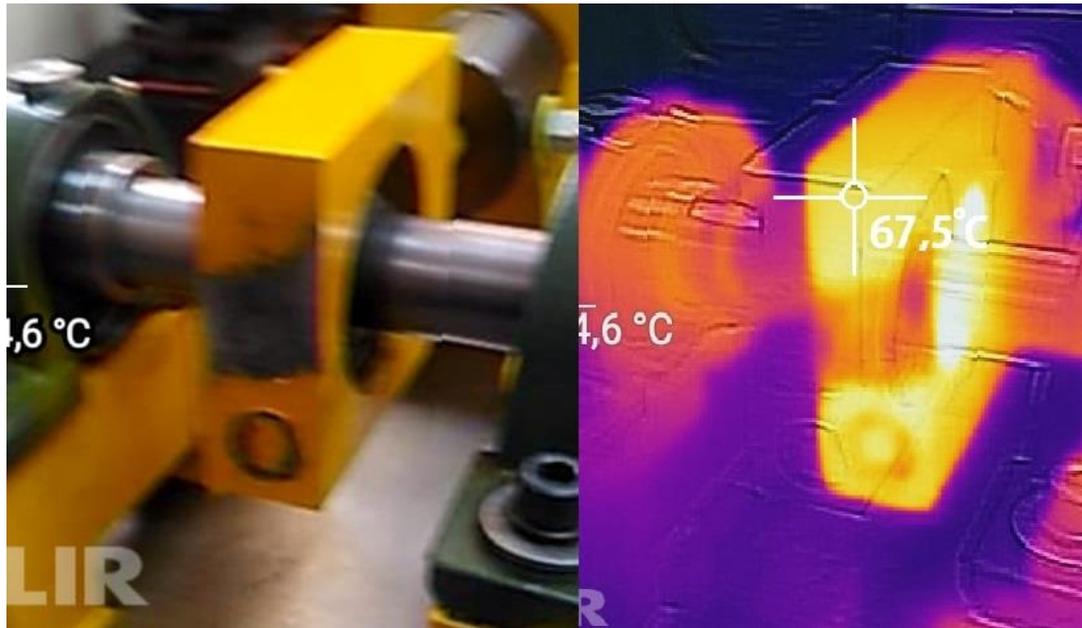
```
ks.test(t3, "pweibull", scale=Alpha3, shape=Beta3) # One-sample Kolmogorov-Smirnov test
```

ANEXO H: DAÑOS EN LOS RODAMIENTOS





ANEXO I: FOTO TERMOGRÁFICA DE UN RODAMIENTO DURANTE EL ENSAYO





ESPOCH

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA - ESCUELA DE INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

ANEXO J: GUÍA DE LABORATORIO

Práctica No 01

TEMA: “CARACTERIZACIÓN DE FALLAS POR LUBRICACIÓN”

1. DATOS GENERALES

NOMBRE(S):	CÓDIGO(S):

GRUPO N°: _____

FECHA DE REALIZACIÓN: _____ FECHA DE ENTREGA: _____

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

- Conocer como la vida útil de los rodamientos varían de acuerdo a la cantidad de lubricación suministrada a través del uso del banco de pruebas diseñado para este fin.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los diferentes sistemas que componen el banco de pruebas.
- Establecer las condiciones necesarias para las fallas de los rodamientos según lubricación.
- Establecer valores base, de alerta y de falla para realizar las pruebas en los rodamientos.
- Realizar el análisis estadístico necesario en las mediciones obtenidas para establecer la relación entre la cantidad de lubricante y la vida útil de los rodamientos.

3. INSTRUCCIONES:

- Explicación magistral del instructor sobre los objetivos de la práctica y las tareas a desarrollar, explicación de los elementos a utilizar y los procedimientos a seguir durante la práctica.
- Exposición magistral del instructor sobre como seleccionaron el tipo lubricante, cantidad de lubricante, selección del rodamiento y cálculo de la carga a ejercerse sobre el rodamiento.
- Desarrollo del procedimiento de la práctica.

4. ACTIVIDADES POR DESARROLLAR

4.1 OBSERVACIÓN Y RECONOCIMIENTO DE INSTRUMENTOS Y EQUIPOS

- **Equipos de protección personal:**

1. Mandil
2. Guantes
3. Gafas de protección
4. Protecciones para el oído

• **Equipos y herramientas:**

- Módulo de pruebas
- Computador
- Analizador de ultrasonidos ULTRAPROBE 15000
- Analizador de vibraciones VIBRACHECK 200
- Vibrómetro TPI 9080
- Rodamientos
- Equipo para alineación Optaling Plus
- Cronómetro
- Dos relojes comparadores
- Balanza digital
- Grasa NLGI 2

4.2 NORMAS DE SEGURIDAD

- Verificar que el equipo este apagado antes de comenzar el desmontaje y montaje del rodamiento dentro del porta rodamientos.
- Verificar que el equipo este apagado durante la alineación del equipo.
- Utilizar todos los equipos de protección descritos anteriormente.
- Cuando el equipo este realizando los ensayos respectivos mantener una distancia apropiada.
- No acercarse al equipo mientras se esté realizando los ensayos respectivos porque se trabaja con altas velocidad.
- No abrir el tablero eléctrico cuando el equipo este realizando los ensayos porque podría producirse una descarga eléctrica.
- Cerciorase que el porta rodamientos este ajustado adecuadamente antes de realizar cualquier ensayo.
- Cerciorarse que, una vez suministrada la presión con la bomba hidráulica manual se halle cerrada la válvula de seguridad.

4.3 PROCEDIMIENTO

1. Colocarse los equipos de protección personal.
2. Pesar la grasa de acuerdo con la condición de lubricación especificada.
3. Colocar la grasa en el rodamiento.
4. Verificar que el interruptor de encendido este en la posición OFF
5. Colocar el rodamiento dentro de la porta rodamientos y montarlo en el banco de pruebas.
6. Realizar la alineación del equipo.
7. Suministrar la presión fijada para los ensayos.
8. Colocar los transductores del equipo de vibraciones VIBRACHECK 200
9. Configurar el colector de datos del VIBRACHECK 200
10. Encender el equipo y el cronometro.
11. Realizar la medición del ultrasonido con

5. RESULTADOS OBTENIDOS

Presente de manera ordenada los resultados obtenidos luego de haber realizado la práctica de laboratorio. En donde se detallen los tiempos obtenidos por las tres condiciones de lubricación y posterior análisis estadístico mediante pruebas de normalidad.

6. CONCLUSIONES

Elabore sus conclusiones de acuerdo con lo observado en el transcurso de los ensayos para el presente laboratorio.

7. RECOMENDACIONES

Describir las diferentes recomendaciones para la realización exitosa de la práctica de laboratorio.

FIRMAS:

ESTUDIANTE
(nombre del/los
estudiantes/s)

DOCENTE
(nombre del docente)

MANUAL DE INSTRUCCIONES MÁQUINA BPR-6206



L₁₀ vida útil de los
rodamientos.



MANUAL DE INSTRUCCIONES

PARA LA MÁQUINA DE PRUEBA DE RODAMIENTOS BPR-6206

La máquina de pruebas para rodamientos BPR-6202, ha sido diseñado, armado y preparado por los señores Ausay Baquero César Aurelio C.I. 060228231-1 y Willam Enrique Estrada Tualombo, estudiantes de la Carrera de; Mantenimiento Industrial, como trabajo de integración curricular previo la obtención del título de ingenieros de mantenimiento.

La máquina BPR-6206 puede ser utilizada para pruebas con rodamientos 6206 de cualquier marca, a múltiples velocidades ya que posee un variador de frecuencia LS –iG5A y un potente motor trifásico de 5 HP trifásico, además de un sistema hidráulico para imprimir una carga radial al rodamiento de prueba de hasta 5000 psi.

La facilidad de prestaciones de esta maquinaria abre su imaginación para pruebas de cálculo de la vida útil de rodamientos sometidos a carga radial, cálculo de la vida útil de la grasa lubricante, calidad y confiabilidad, tiempo de re-lubricación de rodamientos, pruebas de la vida útil de los rodamientos por fallas de lubricación y una amplia gama de pruebas.

Para alcanzar su máximo desempeño y confiabilidad de la máquina en sus proyectos de investigación, siga las instrucciones de funcionamiento, mantenimiento y seguridad expuestas en el presente manual.

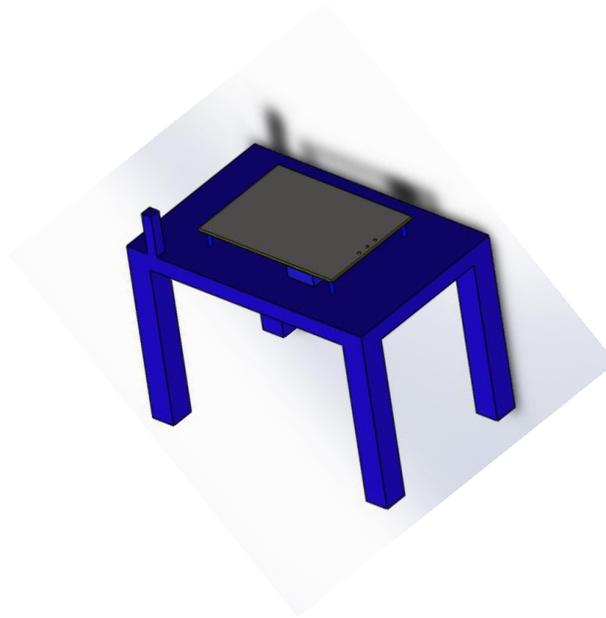
CONTENIDO

01. Ensamble
02. Montaje del sistema de transmisión de potencia
03. Operación
04. Mantenimiento
05. Normas de seguridad

06. Lista de partes.

01. Ensamble

Previo a la instalación de la maquina usted debe tener a mano la lista de partes constitutivas.



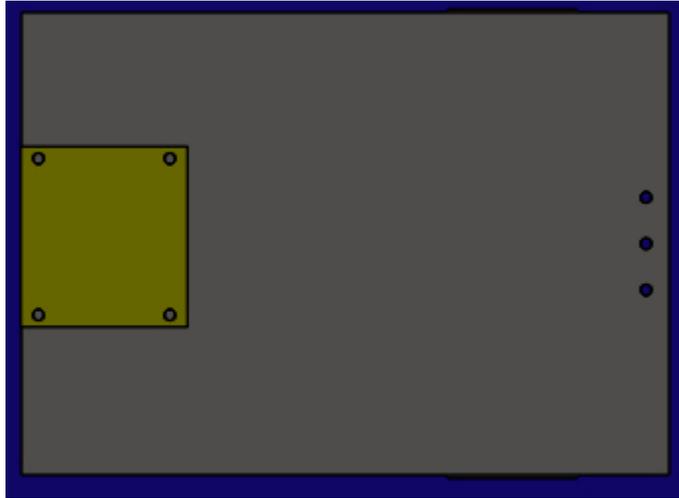
1.1 Anclaje *de la mesa soporte*-. Determinar el espacio suficiente amplio para la instalación de la mesa soporte, un espacio mínimo de 1,20 m X 1,70 m. Las dimensiones de la mesa son: 1,30 m de largo por 0,80m de ancho y una altura de 0,85 m.

1.2 Montaje de la placa base. - Ensamble la placa de acero ASTM A35 de 11mm de espesor y dimensiones (700mmX500mm) sobre la mesa soporte a una altura de 79,10 mm, realice la nivelación de la placa de acero a través de los cuatro pernos de anclaje M12X 100. Colocados para el efecto.

Para la nivelación de la placa base, primeramente debemos nivelar la mesa soporte, y fijarla previamente sobre elementos que minimicen la vibración, pudiendo ser láminas de caucho o láminas de cuero.

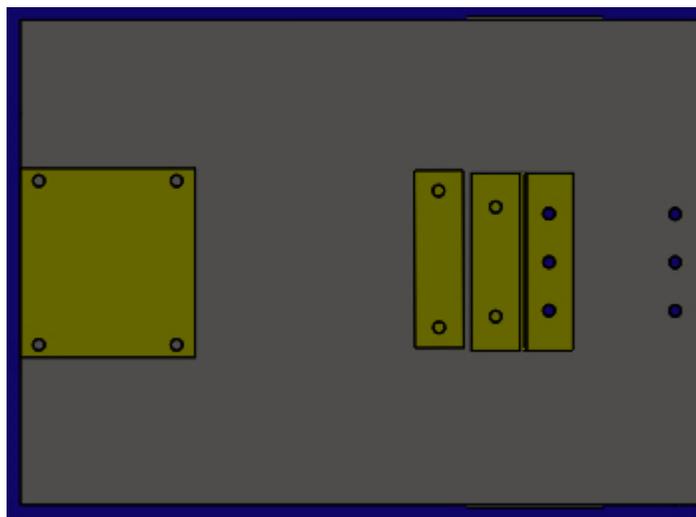
1.3 Coloque la base del motor

Realice el montaje de la placa soporte del motor y fíjelo a través de los pernos M10X20 en los orificios destinados para el efecto en la placa.



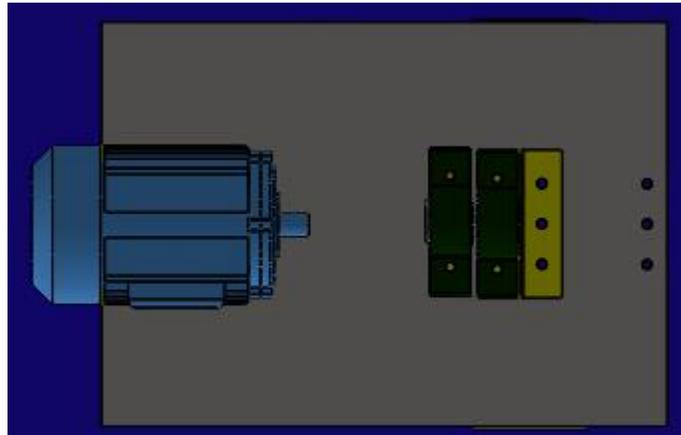
1.4 Coloque las bases de las chumaceras

Para el efecto utilice 8 pernos M10X30 fíjelos correctamente en los orificios roscados de la placa de acero.



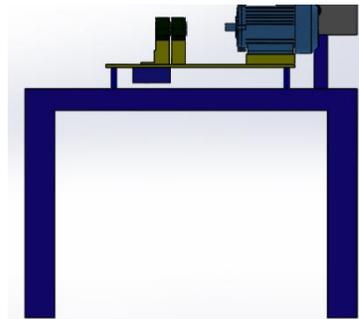
1.5 Coloque el motor y la chumacera.

Con guantes de protección tome el motor y fíjelo con seguridad con cuatro pernos M8X20 sobre la placa base del motor fijada previamente.



1.6 Coloque las chumaceras

Coloque las chumaceras sobre sus placas soportes a través de 4 pernos M10X15 (alíen) como se indica en la figura. Asegúrese de apretarlos correctamente.

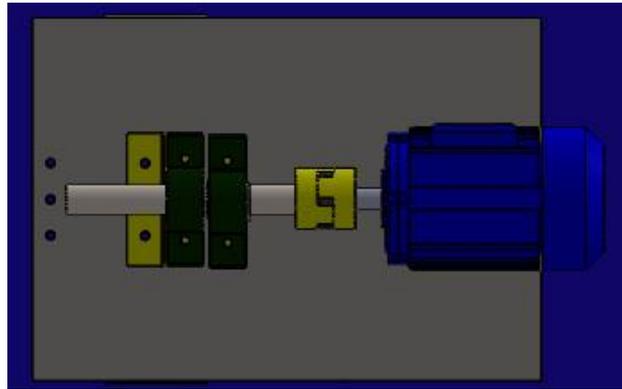


1.7 Coloque la junta flexible

Debe colocar tanto en el eje del motor como en el extremo del eje, las partes del acople flexible, fijarlas con chaveta 7X30 mm y 4 pernos prisioneros M5 X 10.

1.8 Colocar el eje

Una vez fijado el acople flexible se procede a colocar el eje en las chumaceras soporte, determinado de que en su instalación quede perfectamente unido el acople flexible.



1.9 Montaje del rodamiento en el cubo de prueba

En el cubo porta rodamiento proceda a introducir el rodamiento de prueba 6206 en el alojamiento dispuesto para ello, coloque un anillo de apriete y seguidamente coloque la bincha de fijación y seguridad a la pista externa del alojamiento, esto garantiza la sujeción segura del rodamiento en el cubo de prueba.

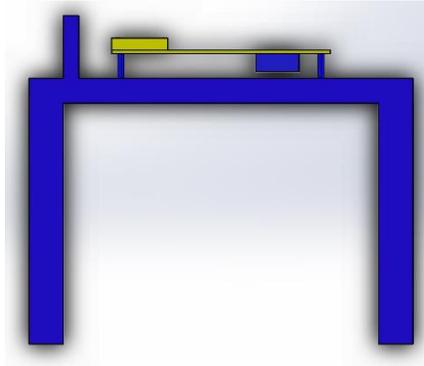
Montaje del cubo porta rodamiento de prueba

Se monta en el eje del sistema dinámico de prueba, hay que tener en cuenta que se deben ajustar los pernos para no tener contratiempos durante las pruebas mediante las adecuadas herramientas especificadas.

Coloque las bases del sistema hidráulico.

Coloque las bases del sistema hidráulico a través de 6 pernos M10 X30 dispuestos para el efecto y fíjelos correctamente en la placa base. Colocamos el seguro mediante la tapa

posterior de la base de la porta rodamientos mediante una tuerca y cuatro pernos M10, hay que tomar en cuenta que se deben ajustarlos adecuadamente. Por última instancia, se debe montar el ducto de la bomba hidráulica para comenzar el proceso posterior que es alinear el equipo.



Alineación

Se procede a realizar la alineación del equipo utilizando el equipo Optaling 200 y relojes comparadores, para lo cual se necesita sin para su adecuada alineación, este proceso ayudara a que el equipo funcione de una manera adecuada.



Operación

1. Verificar que los interruptores estén en posición apagada.
2. Verificar que el equipo este con todos los ajustes necesarios de sus partes móviles.
3. Aplicar una cinta reflectiva en el eje para la toma de medición de velocidad durante los ensayos.
4. Conecte a la fuente de alimentación trifásica a través de la toma de seguridad.
5. Encender el interruptor del variador de frecuencia.
6. Verificar que la frecuencia establecida en el visor sea la adecuada para el trabajo. Caso contrario establezca la frecuencia de operación.
7. Encender el interruptor del motor.
8. Establecer la carga a aplicarse al rodamiento mediante la bomba hidráulica manual verificando la medida en el manómetro disponible, aplicado la carga cerrar la válvula anti-retorno.
9. Conectar los equipos de medición que sean necesarios para las pruebas, como son: analizadores de ultrasonido y vibraciones.
10. Verificar la velocidad del sistema dinámico de operación ubicando mediante un tacómetro.

Nota. En cualquier punto del desarrollo del trabajo en caso de emergencia presionar el botón de seguridad.

Mantenimiento

Tarea	Frecuencia
Lubricación de las chumaceras.	80 horas de funcionamiento
Alineación	Al inicio de cada prueba
Revisión y llenado del aceite hidráulico de la bomba	40 horas de funcionamiento
Ajuste del sistema eléctrico	Una vez al mes.
Mantenimiento del motor	Según catalogo

Limpieza integral del equipo	Después de cada ensayo
------------------------------	------------------------

Herramientas

- Juego de llaves hexagonales



- Llave mixta 13



- Calibrador pie de rey



- Pinza extractora de anillos de seguridad



- Guaípe



- Extractor de rodamientos



- Maso de goma



- Llave francesa



- Flexómetro



- Nivel



Equipos

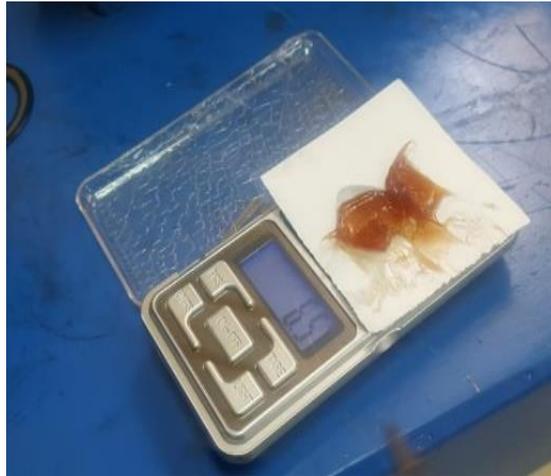
- Alineador laser Optaling



- Relojes comparadores



- Balanza de precisión



- Engrasador electrónico



- Analizador de ultrasonido



- Analizador de vibraciones



- Tacómetro



- Computadora



- Vibrómetro



Equipos de protección de seguridad

- Mandil



- Guantes



- Gafas de protección



- Protecciones para el oído



Medidas de seguridad

- Verificar que el equipo este apagado antes de comenzar el desmontaje y montaje del rodamiento dentro del porta rodamientos.
- Verificar que el equipo este apagado durante la alineación del equipo.
- Utilizar todos los equipos de protección descritos anteriormente.
- Cuando el equipo este realizando los ensayos respectivos mantener una distancia apropiada.
- No acercarse al equipo mientras se esté realizando los ensayos respectivos porque se trabaja con altas velocidad.
- No abrir el tablero eléctrico cuando el equipo este realizando los ensayos porque podría producirse una descarga eléctrica.
- Cerciorarse que la porta rodamientos este ajustado adecuadamente antes de realizar cualquier ensayo.
- Cerciorarse que, una vez suministrada la presión con la bomba hidráulica manual se halle cerrada la válvula de seguridad.

- Delimitación del espacio de seguridad según las normas Ohsas1800-1
- Poseer un extintor
- Prohibido utilizar celulares
- Alto riesgo eléctrico y mecánico
- Nunca dejar la maquina sola en funcionamiento.



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO

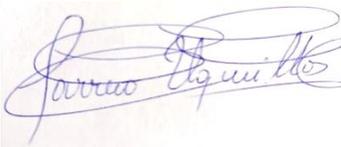


DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS
PARA EL APRENDIZAJE Y LA INVESTIGACIÓN

UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 20 / 08 / 2020

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: César Aurelio Ausay Baquero Willam Enrique Estrada Tualombo
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Mecánica
Carrera: Mantenimiento Industrial
Título a optar: Ingeniero De Mantenimiento
f. Analista de Biblioteca responsable: Ing. CPA. Jhonatan Rodrigo Parreño Uquillas. MBA
 
20-08-2020 0124-DBRAI-UPT-2020