



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

CARRERA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

**“IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE SIMULACIÓN PARA
EL DIAGNÓSTICO VIBRACIONAL DE FALLAS EN
RODAMIENTOS PARA EL ROTOR KIT DEL LABORATORIO DE
DIAGNÓSTICO TÉCNICO Y EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LA
FACULTAD DE MECÁNICA”**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

AUTORES:

ÓSCAR MAURICIO LAURA TELENCHANA

CARLOS JAVIER VERGARA GUANANGA

Riobamba-Ecuador

2022



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

CARRERA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

“IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE SIMULACIÓN PARA EL DIAGNÓSTICO VIBRACIONAL DE FALLAS EN RODAMIENTOS PARA EL ROTOR KIT DEL LABORATORIO DE DIAGNÓSTICO TÉCNICO Y EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LA FACULTAD DE MECÁNICA”

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

AUTORES: ÓSCAR MAURICIO LAURA TELENCHANA

CARLOS JAVIER VERGARA GUANANGA

DIRECTORA: Ing. EUGENIA MERCEDES NARANJO VARGAS

Riobamba-Ecuador

2022

© 2022, Óscar Mauricio Laura Telenchana & Carlos Javier Vergara Guananga

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

Nosotros, Óscar Mauricio Laura Telenchana y Carlos Javier Vergara Guananga, declaramos que el presente trabajo de integración curricular es de nuestra autoría y 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 integración curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 24 de febrero del 2022



Oscar Mauricio Laura Telenchana
180488429-2



Carlos Javier Vergara Guananga
060533094-3

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

CARRERA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto Técnico, **“IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE SIMULACIÓN PARA EL DIAGNÓSTICO VIBRACIONAL DE FALLAS EN RODAMIENTOS PARA EL ROTOR KIT DEL LABORATORIO DE DIAGNÓSTICO TÉCNICO Y EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LA FACULTAD DE MECÁNICA”**, realizado por los señores **ÓSCAR MAURICIO LAURA TELENCHANA** y **CARLOS JAVIER VERGARA GUANANGA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Marco Antonio Ordóñez Viñán PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2022-02-24
Ing. Eugenia Mercedes Naranjo Vargas DIRECTORA DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2022-02-24
Ing. Eduardo Segundo Hernández Dávila MIEMBRO DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2022-02-24

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mis padres y familiares quienes con su trabajo, sacrificio y paciencia me han permitido llegar a cumplir esta meta. Toda mi gratitud a ellos, a mi manera los amo a todos.

A mi hermana por ser inspiración y apoyo moral a lo largo de mi carrera universitaria.

ÓSCAR MAURICIO LAURA TELENCHANA

La dedicación y esfuerzos de años se ven reflejados con la culminación de esta etapa más en mi vida, la cual gracias al sacrificio arduo de mi padre, mi madre y hermanos se logró con éxito. Para todos ellos va dedicado el logro de este trabajo.

CARLOS JAVIER VERGARA GUANANGA

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la Carrera de Ingeniería de Mantenimiento Industrial y a toda su planta docente que con sus conocimientos, experiencia, paciencia y motivación han logrado que pueda concluir mi formación profesional con éxito, a nuestra tutora Ing. Eugenia Naranjo y asesor Ing. Eduardo Hernández por guiarme y formar parte de otro objetivo alcanzado.

ÓSCAR MAURICIO LAURA TELENCHANA

Agradezco a Dios por darme la fortaleza, la sabiduría y el ímpetu para lograr alcanzar una meta más en mi vida, a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, específicamente a la Escuela de Ingeniería de Mantenimiento Industrial por haberme dado la oportunidad de ser una persona útil para la sociedad con la profesión adquirida.

En particular a mis padres quienes con sus consejos supieron guiarme hasta lograr culminar con este largo camino, mis hermanos que con sus palabras de aliento supieron animarme en momentos difíciles, también como no agradecer a mis abuelitos quienes por parte de ellos nunca faltó un consejo, mis tíos, mis tías quienes supieron darme valor y fuerzas para seguir adelante, a mis amigos que siempre estuvieron ahí en todo momento a todos muchas gracias por haberme acompañado en toda esta etapa de mi vida.

CARLOS JAVIER VERGARA GUANANGA

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xiv
ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....	xv
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xvi
RESUMEN.....	xvii
SUMMARY.....	xviii
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA.....	2
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Justificación.....	3
1.3. Planteamiento del problema.....	3
1.4. Objetivos.....	4
1.4.1. <i>Objetivo general</i>	4
1.4.2. <i>Objetivos específicos</i>	4

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	5
2.1. Rodamientos.....	5
2.1.1. <i>Componentes de un rodamiento</i>	5
2.1.2. <i>Tipos de rodamientos</i>	5
2.2. Fallos en rodamientos.....	6
2.2.1. <i>Fallo en la pista interna</i>	7
2.2.2. <i>Fallo en la pista externa</i>	7
2.2.3. <i>Fallo en el elemento rodante</i>	8
2.2.4. <i>Desgaste de la jaula</i>	9
2.3. Consecuencias de los fallos en rodamientos.....	10
2.3.1. <i>Fatiga</i>	11
2.3.2. <i>Desgaste</i>	12

2.3.3.	<i>Corrosión</i>	12
2.3.4.	<i>Deformación plástica</i>	13
2.3.5.	<i>Fracturas y agrietamientos</i>	13
2.3.6.	<i>Corrosión eléctrica</i>	14
2.4.	Análisis de fallos en rodamientos	14
2.4.1.	<i>Componentes del espectro vibratorio</i>	14
2.4.2.	<i>¿Cómo analizar un espectro vibratorio?</i>	14
2.4.3.	<i>Datos de vibraciones</i>	15
2.4.4.	<i>Parámetros importantes para la medición de vibraciones mecánicas</i>	15
2.4.5.	<i>Análisis en el dominio del tiempo</i>	16
2.4.6.	<i>Análisis en el dominio de la frecuencia</i>	16
2.4.6.1.	<i>La transformada discreta de Fourier (TDF)</i>	17
2.4.6.2.	<i>La transformada rápida de Fourier (TRF)</i>	17
2.4.6.3.	<i>La transformada inversa rápida de Fourier (IFFT)</i>	18
2.5.	Mecanismos de fallos en rodamientos	18
2.5.1.	<i>Defectos por obturaciones</i>	18
2.5.2.	<i>Defectos en la lubricación</i>	19
2.5.3.	<i>Juego insuficiente</i>	19
2.5.4.	<i>Elementos incorrectos o deformados</i>	20
2.5.5.	<i>Interferencia entre elementos</i>	20
2.5.6.	<i>Defectos externos del rodamiento</i>	21
2.6.	Diagnóstico de los fallos en rodamientos	21
2.6.1.	<i>Elaborar tendencias</i>	21
2.6.2.	<i>Cálculo de las frecuencias generadas por rodamientos con defectos</i>	22
2.6.3.	<i>Desgaste en rodamientos</i>	23
2.6.4.	<i>Bandas laterales</i>	23
2.6.5.	<i>Rodamientos con elementos rodantes desalineados</i>	24
2.6.6.	<i>Holgura de rodamientos</i>	24
2.6.7.	<i>Estimación de la gravedad de la vibración</i>	24
2.7.	Etapas de los fallos de los rodamientos	25
2.7.1.	<i>Primera etapa</i>	25
2.7.2.	<i>Segunda etapa</i>	26
2.7.3.	<i>Tercera etapa</i>	27
2.7.4.	<i>Cuarta etapa</i>	27

CAPÍTULO III

3.	IMPLEMENTACIÓN DEL MÓDULO DE SIMULACIÓN	29
3.1.	Lista de los principales fallos y sus consecuencias	29
3.2.	Diseño del módulo de simulación de fallas en rodamientos	30
3.2.1.	<i>Selección del tipo de acero para la estructura del módulo</i>	30
3.2.2.	<i>Especificaciones del motor eléctrico</i>	30
3.2.3.	<i>Dimensionamiento del eje principal</i>	31
3.2.3.1.	<i>Factor por tamaño a la resistencia de fatiga</i>	32
3.2.4.	<i>Selección de rodamientos en los puntos B, C y D</i>	36
3.2.5.	<i>Selección de acoplamiento motor-eje</i>	39
3.3.	Delineamiento del módulo de simulación en SolidWorks Académico	42
3.3.1.	<i>Delineamiento de la base del módulo de simulación</i>	42
3.3.2.	<i>Modelación del mecanismo de sujeción del rodamiento de pruebas</i>	43
3.3.3.	<i>Montaje de los elementos del módulo de simulación</i>	44
3.4.	Construcción del módulo de simulación de fallas en rodamientos	48
3.4.1.	<i>Construcción de la mesa del módulo de simulación</i>	48
3.4.2.	<i>Mecanizado de las piezas del módulo de simulación</i>	48
3.4.3.	<i>Ensamblaje de las piezas mecanizadas</i>	50
3.4.4.	<i>Acople del módulo de simulación a la mesa</i>	51
3.5.	Pruebas en el módulo de simulación de fallas en rodamientos	52
3.5.1.	<i>Procedimiento de las pruebas</i>	52
3.5.2.	<i>Realización de fallas</i>	53
3.5.2.1.	<i>Rodamiento con defectos en la pista externa</i>	53
3.5.2.2.	<i>Rodamiento con defectos en la pista interna</i>	54
3.5.2.3.	<i>Rodamiento con defectos en las pistas interna y externa</i>	55
3.5.2.4.	<i>Rodamiento en condición normal</i>	56
3.5.3.	<i>Medición de la frecuencia natural del módulo de simulación</i>	57
3.5.4.	<i>Medición de frecuencias características</i>	60
3.5.4.1.	<i>Medición de frecuencias para el rodamiento en condición normal</i>	60
3.5.4.2.	<i>Medición de frecuencias para el rodamiento con falla en la pista interna</i>	61
3.5.4.3.	<i>Medición de frecuencias para el rodamiento con falla en la pista externa</i>	62
3.5.4.4.	<i>Medición de frecuencias para el rodamiento con dos tipos de fallas</i>	64
3.5.4.5.	<i>Tabulación de los valores de las frecuencias características</i>	65

CAPÍTULO IV

4.	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	67
4.1.	Constatación del diseño del módulo de simulación.....	67
4.2.	Constatación de la construcción del módulo de simulación.....	67
4.3.	Elaboración del manual de operación.....	68
4.4.	Elaboración de la guía práctica de laboratorio.....	68
4.5.	Elaboración del plan de mantenimiento.....	69
4.6.	Comparación de mediciones.....	69
4.6.1.	<i>Comparación de las frecuencias de fallo.....</i>	69
	CONCLUSIONES.....	73
	RECOMENDACIONES.....	74
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2: Frecuencias de resonancia	26
Tabla 1-3: Principales fallos en rodamientos y sus consecuencias	29
Tabla 2-3: Factores básicos a considerar en la selección de materiales.....	30
Tabla 3-3: Datos técnicos del motor WEG W22 IE2.....	30
Tabla 4-3: Factores de tamaño	32
Tabla 5-3: Factores de confiabilidad aproximados Cr	33
Tabla 6-3: Dimensiones de los elementos de la base del módulo.....	42
Tabla 7-3: Dimensiones de los elementos del mecanismo de sujeción.....	43
Tabla 8-3: Lista de materiales del módulo de simulación.....	47
Tabla 9-3: Puntos de medición.....	52
Tabla 10-3: Valores de frecuencia natural para cada plano de medición.....	59
Tabla 11-3: Frecuencias de fallo, plano vertical	65
Tabla 12-3: Frecuencias de fallo, plano horizontal.....	66
Tabla 13-3: Frecuencias de fallo, plano axial	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2: Componentes de los rodamientos.	5
Figura 2-2: Mapa conceptual de los tipos de rodamientos.	6
Figura 3-2: Tipos de fallos en los rodamientos.....	7
Figura 4-2: Espectro de un rodamiento con defecto de la pista interna.....	7
Figura 5-2: Espectro de un rodamiento con defecto en la pista externa.	8
Figura 6-2: Espectro de rodamiento con defecto en las bolas.....	9
Figura 7-2: Problemas que originan la FTF.....	10
Figura 8-2: Consecuencias de los fallos en rodamientos.	11
Figura 9-2: Aro interior de rodamiento de rodillos a rótula.....	12
Figura 10-2: Desgaste en la superficie exterior de la jaula.....	12
Figura 11-2: Anillo interior de un rodamiento de rodillos esféricos.....	13
Figura 12-2: Fractura a causa de cargas en el anillo exterior.....	13
Figura 13-2: Corrosión en el anillo interior de un rodamiento.	14
Figura 14-2: Componentes de un espectro.....	14
Figura 15-2: Colocación del acelerómetro.....	15
Figura 16-2: Dirección de las mediciones.	16
Figura 17-2: Dominio de tiempo vs. Dominio de frecuencia.	17
Figura 18-2: Daños superficiales producto de la acción de residuos.....	18
Figura 19-2: Lubricante excesivo.	19
Figura 20-2: Ajuste excesivo del soporte.	19
Figura 21-2: Aro exterior de rodamiento de rodillos a rótula.....	20
Figura 22-2: Huella de desgaste en la superficie del elemento rodante.....	20
Figura 23-2: Falla por fatiga producto de contacto con impurezas.....	21
Figura 24-2: Rodamiento chueco.....	24
Figura 25-2: Etapa inicial de evolución del defecto	26
Figura 26-2: Etapa desarrollo del defecto.....	27
Figura 27-2: Etapa crisis del rodamiento.	27
Figura 28-2: Etapa de fallo inminente del rodamiento.	28
Figura 1-3: Disposición de los rodamientos y acople.....	31
Figura 2-3: Propiedades del acero AISI 1144.....	31
Figura 3-3: Resistencia a la fatiga, en función de la resistencia a la tensión.	32
Figura 4-3: Diámetros propuestos para el eje.	34
Figura 5-3: Unidades de rodamientos de bolas Y.....	38

Figura 6-3: Rodamientos rígidos de una hilera de bolas.....	39
Figura 7-3: Factor de servicio para la selección del acople.....	40
Figura 8-3: Acoples tipo L, AL & LC.....	41
Figura 9-3: Base del módulo de simulación de fallas en rodamientos.....	42
Figura 10-3: Mecanismo de sujeción.....	43
Figura 11-3: Montaje del mecanismo de sujeción.....	44
Figura 12-3: Montaje del motor y chumaceras.....	45
Figura 13-3: Montaje del eje en el módulo de simulación.....	45
Figura 14-3: Montaje del mecanismo de sujeción en el módulo.....	46
Figura 15-3: Vista explosionada del módulo de simulación.....	46
Figura 16-3: Componentes en conjunto del módulo de simulación.....	47
Figura 17-3: Mesa ensamblada del módulo de simulación.....	48
Figura 18-3: Corte de las piezas del módulo de simulación.....	49
Figura 19-3: Piezas mecanizadas.....	49
Figura 20-3: Ensamblaje de las bases del módulo.....	50
Figura 21-3: Módulo de simulación ensamblado.....	50
Figura 22-3: Perforación de los huecos para la sujeción.....	51
Figura 23-3: Módulo de simulación acoplado a la mesa.....	51
Figura 24-3: Puntos de medición del módulo de simulación.....	52
Figura 25-3: Inducción de ralladuras en la pista externa del rodamiento.....	53
Figura 26-3: Ralladuras en la pista externa del rodamiento.....	54
Figura 27-3: Inducción de ralladuras en la pista interna del rodamiento.....	54
Figura 28-3: Ralladuras en la pista interna del rodamiento.....	55
Figura 29-3: Elaboración de defectos en la pista interna.....	55
Figura 30-3: Elaboración de defectos en la pista externa.....	56
Figura 31-3: Rodamiento en condición normal.....	56
Figura 32-3: Espectro de la frecuencia natural en el plano vertical.....	57
Figura 33-3: Espectro de la frecuencia natural en el plano horizontal.....	58
Figura 34-3: Espectro de la frecuencia natural en el plano axial.....	58
Figura 35-3: Espectro de envolvente, plano vertical, condición normal.....	60
Figura 36-3: Espectro de envolvente, plano horizontal, condición normal.....	60
Figura 37-3: Espectro de envolvente, plano axial, condición normal.....	61
Figura 38-3: Espectro de envolvente, plano vertical, falla pista interna.....	61
Figura 39-3: Espectro de envolvente, plano horizontal, falla pista interna.....	62
Figura 40-3: Espectro de envolvente, plano axial, falla pista interna.....	62
Figura 41-3: Espectro de envolvente, plano vertical, falla pista externa.....	63

Figura 42-3: Espectro de envolvente, plano horizontal, falla pista externa.	63
Figura 43-3: Espectro de envolvente, plano axial, falla pista externa.	63
Figura 44-3: Espectro de envolvente, plano vertical, falla pista externa e interna.	64
Figura 45-3: Espectro de envolvente, plano horizontal, falla pista externa e interna.	64
Figura 46-3: Espectro de envolvente, plano axial, falla pista externa e interna.	65
Figura 1-4: Módulo de simulación delineado en SolidWorks.	67
Figura 2-4: Módulo de simulación ensamblado.	68

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-4: Comparación de la medición del BPFO en diferentes planos	70
Gráfico 2-4: Comparación de la amplitud de la envolvente para el BPFO.....	70
Gráfico 3-4: Comparación de la medición del BPFI en diferentes planos.....	71
Gráfico 4-4: Comparación de la amplitud de la envolvente para el BPFI	71
Gráfico 5-4: Comparación de la medición del BPFO y BPFI en diferentes planos.....	72
Gráfico 6-4: Comparación de la amplitud de la envolvente para el BPFO y BPFI	72

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

S:	Frecuencia de operación del rotor
FTF:	Frecuencia de paso de la jaula
BPFO:	Frecuencia de paso por el aro exterior
BPFI:	Frecuencia de paso por el aro interior
BSF:	Frecuencia de paso de los elementos rodantes
TDF:	Transformada discreta de Fourier
TRF:	Transformada rápida de Fourier
IFFT:	Transformada inversa rápida de Fourier
rpm:	Revoluciones por minuto
B_d:	Diámetro de la bola
P_a:	Módulo de rodamiento
n:	Número de elementos rodantes
θ:	Ángulo de contacto
rms:	Root medium square, raíz cuadrática media

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** MANUAL DE OPERACIÓN
- ANEXO B:** GUÍA PRÁCTICA DE LABORATORIO
- ANEXO C:** PLAN DE MANTENIMIENTO
- ANEXO D:** ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL RODAMIENTO 6208-2RS1
- ANEXO E:** ANÁLISIS ESTÁTICO DEL RODAMEINTO 6208-2RS1
- ANEXO F:** MEDICIONES ADICIONALES
- ANEXO G:** ANÁLISIS ECONÓMICO
- ANEXO H:** PLANOS

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo implementar un módulo de simulación para el diagnóstico vibracional de fallas en rodamientos para el rotor kit del laboratorio de diagnóstico técnico y eficiencia energética, para lo cual se realizó cálculos a fin de seleccionar los elementos y posteriormente realizar la comparación de los valores de frecuencia y amplitud de envolvente, con rodamientos en buen y mal estado. Primero, se procedió a la selección de las piezas mecánicas, mediante ciertas consideraciones técnicas, seguidamente, se comenzó con la construcción del módulo, para realizar los ensayos mediante análisis vibracional, usando el rodamiento 6208-2RS1; posteriormente se realizó un plan de mantenimiento, en base a la metodología de recomendaciones de los fabricantes, seguido por una guía de laboratorio y un manual de operación, tomando en cuenta criterios como la seguridad de los estudiantes, la facilidad para relacionarse con el módulo y el fortalecimiento de conceptos. Se hizo la comparación de mediciones, dando como resultado que el valor más alto de amplitud de envolvente para un rodamiento con frecuencias BPFO es de 0,386 gE, en presencia de frecuencias BPF1, el valor más prominente de amplitud de envolvente es de 0,116 gE, y los valores de amplitud más elevados ante frecuencias BPFO y BPF1, son de 0,292 y 0,486 gE; los valores más bajos se obtuvieron en el plano axial. Se concluye que para el rodamiento con la frecuencia BPFO, el mejor punto de medición es el horizontal, para la frecuencia BPF1, la mejor dirección es el vertical; y teniendo las frecuencias de BPFO y BPF1 los mejores planos de medición son el vertical y horizontal, resulta más complicado detectar fallas en el plano axial. Se recomienda inducir fallas en otros tipos de rodamientos para estudiar el comportamiento que tienen al someterlos a un trabajo continuo.

Palabras clave: <MÓDULO DE SIMULACIÓN> <DIAGNÓSTICO VIBRACIONAL>
<FALLAS EN RODAMIENTOS> <AMPLITUD DE ENVOLVENTE> <FRECUENCIAS DE FALLAS DE RODAMIENTOS>.



Firmado electrónicamente
por:

**HOLGER
GERMAN
RAMOS
UVIDIA**

0494-DBRA-UPT-2022
2022-03-17

SUMMARY

The objective of this research work was to implement a simulation module for the vibrational diagnosis of faults in rotor bearings for the kit of the technical diagnosis and energy efficiency laboratory, for which calculations were made in order to select the elements and subsequently carry out the comparison of the frequency values, and amplitude envelope with bearings in good and bad condition. First, the selection of the mechanical parts was carried out, based on certain technical considerations, then the construction of the module began, to carry out the tests by means of vibrational analysis, using the 6208-2RS1 bearing; Subsequently, a maintenance plan was carried out, based on the manufacturers' recommendations methodology, followed by a laboratory guide and an operation manual, taking into account criteria such as the students' safety, the ease of interacting with the module and strengthening concepts. The comparison of measurements was made, giving as a result that the highest value of amplitude envelope for a bearing with BPFO frequencies is 0,386 gE, in the presence of BPFI frequencies. The most prominent value of envelope amplitude is 0,116 gE, and the highest amplitude values at BPFO and BPFI frequencies are 0,292 and 0,486 gE; the lowest values were obtained in the axial plane. It is concluded that for the bearing with the BPFO frequency, the best measurement point is the horizontal, for the BPFI frequency, the best direction is the vertical; and having the BPFO and BPFI frequencies, the best measurement planes are the vertical and horizontal. It is more difficult to detect faults in the axial plane. It is recommended to induce faults in other types of bearings to study their behavior when subjected to continuous work.

Keywords: <SIMULATION MODULE> <VIBRATIONAL DIAGNOSIS> <FAULTS IN BEARINGS> <AMPLITUDE ENVELOPE> <FREQUENCIES OF BEARING FAULTS>.

SANDRA
PAULINA
PORRAS
PUMALEMA



Firmado
digitalmente por
SANDRA PAULINA
PORRAS PUMALEMA
Fecha: 2022.03.30
12:31:51 -05'00'

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el estudio de vibraciones mecánicas ha cobrado una gran importancia en la supervisión de equipos rotativos, ya que permite determinar el estado o condición real de los mismos. Los equipos rotativos al ser sometidos a distintos tipos de cargas presentan modificaciones que delimitan su funcionamiento provocando incomodidad al personal que lo maneja y disminuyendo progresivamente la vida útil de los elementos.

La implementación de un módulo de simulación para el diagnóstico vibracional de fallas en rodamientos para el rotor kit del laboratorio de diagnóstico técnico y eficiencia energética de la ESPOCH, desarrollara una mejor precepción de los distintos tipos de fallos que pueden presentarse en los rodamientos, mediante el uso de un software de mantenimiento llamado MAINTraQ Predictive, basado específicamente en el estudio de vibraciones con ayuda de un instrumento tecnológico denominado Vibracheck, esencial para la recolección de datos.

Para el presente trabajo de integración curricular, primero, se llevó a cabo la selección de las piezas mecánicas, posterior a ello se delineó el módulo de simulación en SolidWorks Académico, y se realizó la construcción del módulo de simulación para la toma de datos mediante pruebas en diferentes puntos (vertical, horizontal y axial) y finalmente se efectuó la interpretación y comparación de los ensayos realizados mediante un análisis comparativo. Además, se realizó un plan de mantenimiento, guía de laboratorio y manual de operación para un mejor entendimiento del diagnóstico vibracional de fallas en rodamientos por parte de los estudiantes de la carrera de mantenimiento industrial.

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

1.1. Antecedentes

El laboratorio de diagnóstico técnico y eficiencia energética, localizado en la ciudad de Riobamba, provincia de Chimborazo, en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, facultad de mecánica, requiere de nuevos módulos para el análisis vibracional en rodamientos, puesto que es de gran importancia en la industria moderna poder detectar defectos en los rodamientos de máquinas críticas, en una etapa incipiente de falla (Ibáñez, 2011, p. 18).

Las fallas en los rodamientos se encuentran entre las causas más comunes en máquinas rotativas (Rai y Upadhyay, 2016, p. 291). Ya que, los rodamientos son elementos que están expuestos a cargas excesivas, montaje inadecuado, sobre velocidad, y sobre temperatura de operación, lo que conlleva a una variedad de fallos. Los rodamientos deben absorber todo tipo de vibraciones de la máquina, reduciendo las pérdidas por rozamiento, lo que compromete aún más su vida útil.

El análisis de vibraciones en rodamientos es una de las técnicas más estudiadas y utilizadas debido a que determina la condición operativa de los equipos, se fundamenta en identificar problemas antes de que se vuelvan demasiado graves, esto se logra mediante un monitoreo continuo. Además, el espectro de vibración proporciona una cantidad de información importante acerca del estado de funcionamiento del rodamiento antes de que se produzca un paro catastrófico afectando la seguridad e integridad de los trabajadores. Así mismo, se puede estudiar el análisis del espectro de vibraciones para fallas en elementos mecánicos y en particular para diferentes tipos de rodamientos (Khadersab y Shivakumar, 2018, p. 247).

Un análisis periódico de vibraciones en los rodamientos permite a los delegados de mantenimiento planificar de la manera más exacta posible las tareas de mantenimiento preventivas a realizar en una máquina rotativa, como lo menciona White (2010, p. 11), en una planta donde se usa el mantenimiento basado en la condición el estado general de las máquinas está conocido en cualquier momento y será posible una planificación del mantenimiento más precisa.

1.2. Justificación

Con el avance tecnológico en la actualidad es posible, a nivel industrial, realizar un control a los activos físicos (elemento), poder vigilar constantemente a las máquinas, y anticiparnos al fallo funcional, con lo cual se reducirá el impacto directo e indirecto que ocasiona a la empresa identificando los principales fallos que pueden presentarse.

Las fallas en rodamientos conducen a un funcionamiento inadecuado de la maquinaria rotativa, en aplicaciones industriales pequeñas o grandes (Khadersab y Shivakumar, 2018, p. 247). En todo momento, si no se diagnostica el daño en el rodamiento, y no se lo reemplaza antes de que se produzca una falla catastrófica, puede ocurrir un daño irreparable al equipo y a sus demás componentes, e incluso a la integridad del trabajador. De la misma manera, cuando un rodamiento falla el resultado puede ser muy costoso en términos de paros no planeados.

En el laboratorio de diagnóstico técnico y eficiencia energética se implementará un módulo de simulación de fallas para rodamientos el cual permitirá representar defectos al momento de operación de los rodamientos. Utilizando un analizador de vibraciones recolectaremos datos de las simulaciones, para poder interpretarlos y anticiparnos al fallo del rodamiento. Al realizar análisis vibracional de un rodamiento, se puede hacer una deducción de su vida útil restante (Jantunen et al., 2018, p. 2035).

1.3. Planteamiento del problema

A nivel industrial, la falla repentina en los rodamientos afecta al funcionamiento de las máquinas y equipos rotativos, generando pérdidas económicas, y disminuyendo la seguridad de los trabajadores. Es así que las causas más probables de fallas en rodamientos se encuentran distribuidas; 36% del resultado de una lubricación inadecuada; 34% resultado de una operación inadecuada como pudiera ser por: cargas dinámicas excesivas sobre el rodamiento, producto de una falla de diseño de la máquina o de la presencia de fuerzas externas como desbalance y desalineamiento; 14% se debe a la contaminación, incluyendo humedad y cerca del 16% son defectos originados en el proceso de montaje (Medrano-Hurtado et al., 2016, p. 75).

Los problemas en rodamientos pueden ser identificados con precisión, pudiéndose predecir el fallo catastrófico con suficiente antelación (hasta seis meses), lo cual contribuye a efectuar una planificación exitosa de las reparaciones (Palomino Marín, 2007, p. 170–171).

El aprendizaje práctico de la asignatura de diagnóstico técnico se lo realiza en el laboratorio de diagnóstico técnico y eficiencia energética, el cual cuenta actualmente, con un solo módulo de simulación para el diagnóstico vibracional de fallas en rodamientos, los estudiantes lo utilizan en grupos de 10 personas y en un corto período de tiempo, lo que tiene como consecuencia el no poder ofrecer un aprendizaje de calidad, generando un vacío de conocimiento en el diagnóstico anticipado de fallas en los rodamientos. Al no poder detectar este problema los estudiantes graduados en la escuela de ingeniería de mantenimiento industrial tienen bajo desempeño laboral.

La implementación de un módulo de simulación para el diagnóstico vibracional de fallas en rodamientos permitirá a los estudiantes tener un aprendizaje más óptimo en el diagnóstico anticipado de las fallas en rodamientos, pudiendo formarse grupos más reducidos para el uso de los módulos de simulación, los cuales se espera que sean de 4 a 5 personas.

1.4. Objetivos

1.4.1. *Objetivo general*

Implementar un módulo de simulación para el diagnóstico vibracional de fallas en rodamientos para el rotor kit del laboratorio de diagnóstico técnico y eficiencia energética.

1.4.2. *Objetivos específicos*

Revisión bibliográfica de las principales fallas en los rodamientos y sus consecuencias.

Diseñar las piezas mecánicas que conforman el módulo de simulación para el diagnóstico vibracional de fallas en rodamientos.

Construir el módulo de simulación para el diagnóstico vibracional de fallas en rodamientos con las piezas mecánicas dimensionadas.

Realizar un análisis comparativo de los valores obtenidos al analizar los espectrogramas de rodamientos con falla en la pista interna, externa, e interna y externa.

Desarrollar el manual de operación, guía práctica de laboratorio, y un plan de mantenimiento para el módulo de simulación para el diagnóstico vibracional de fallas en rodamientos.

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Rodamientos

Los rodamientos son utilizados para sostener y dirigir, con fricción insignificante, elementos mecánicos giratorios de máquinas, por ejemplo, árboles, ejes o ruedas, por lo que admiten velocidades de giro elevadas a la vez reducen el ruido, el calor, el consumo energético y el roce. “Un rodamiento es un elemento mecánico que reduce la fricción entre un eje y las piezas conectadas a este, que le sirve de apoyo y facilita su desplazamiento” (Cabañas, 2011, p. 52).

2.1.1. Componentes de un rodamiento

El rodamiento es un elemento estandarizado que consta de un aro interior y un aro exterior entre los que se desplazan los elementos rodantes, los mismos que van dentro de la jaula. Además, poseen sellos de protección en ambos lados, para mantener el lubricante dentro del rodamiento. En la figura 1-2, se muestran las principales partes que componen un rodamiento.

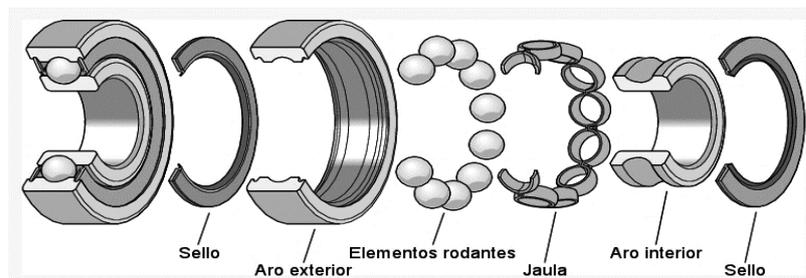


Figura 1-2: Componentes de los rodamientos.

Fuente: (Manual SKF, 2017)

2.1.2. Tipos de rodamientos

Existen diversas formas de clasificar a los rodamientos como, por ejemplo; según el elemento rodante (bola o rodillo) y el sentido de la carga que soportan. Según el elemento rodante, las bolas y los rodillos se diferencian en la forma en que entran en contacto con los caminos de rodadura, establecen contacto puntual y contacto lineal respectivamente, como se muestra en la figura 2-2. Es así que se clasificó a los rodamientos de la siguiente manera:

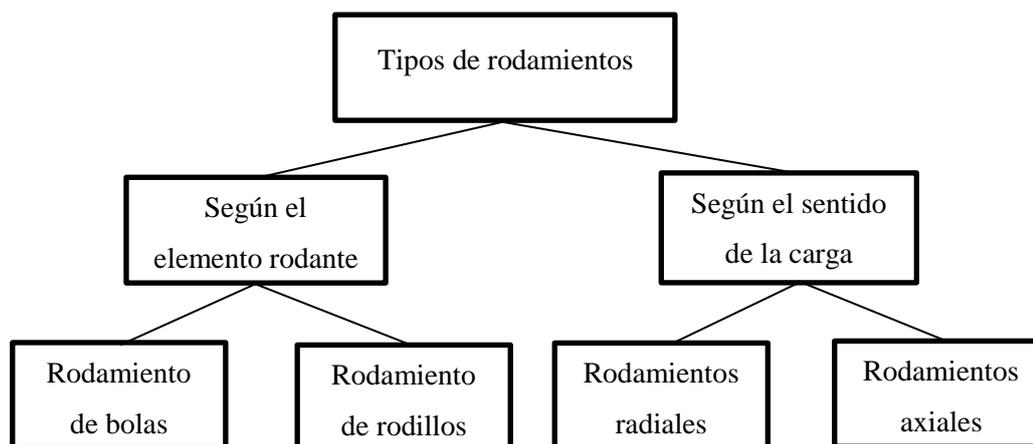


Figura 2-2: Mapa conceptual de los tipos de rodamientos.

Fuente: (Manual SKF, 2017)

Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

2.2. Fallos en rodamientos

Los rodamientos tienen una gran importancia en el funcionamiento de máquinas rotativas, debido a que soportan grandes cargas, y el fallo de estos provoca pérdidas de producción y generan daños a las partes de contacto, además de costos por reparaciones. La operación de la maquinaria rotativa depende íntegramente del estado de salud del rodamiento, aproximadamente el 45% de las fallas del equipo son debido a fallas de rodamiento (Rai y Upadhyay, 2016; Benali et al., 2013).

Los rodamientos con defectos en una máquina rotativa pueden ocasionar vibraciones con componentes en cuatro frecuencias:

- Frecuencia fundamental de jaula (FTF).
- Frecuencia de paso por el aro exterior (BPFO).
- Frecuencia de paso por el aro interior (BPFI).
- Frecuencia de giro de bola/de rodillo (BSF).

Cada una de estas frecuencias poseen espectros característicos que sirven para poder diagnosticarlas, y realizar un mantenimiento basado en la condición a máquinas rotativas.

Los diferentes tipos de fallos que pueden originarse en los rodamientos, son: fallo en la pista interna, externa, elementos rodantes, jaula, o cualquier combinación (Taylor, 2003, p. 178). Es así que se ilustró el siguiente cuadro sinóptico, figura 3-2, diferenciando cada falla.

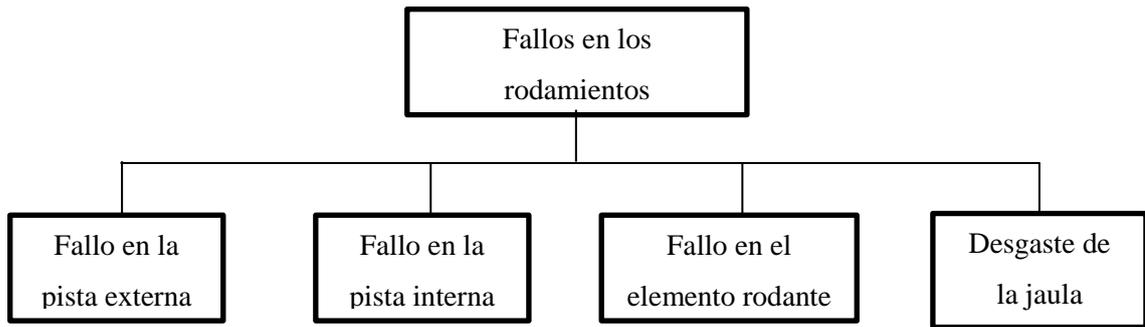


Figura 3-2: Tipos de fallos en los rodamientos.

Fuente: (Taylor, 2003, p. 178)

Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

2.2.1. *Fallo en la pista interna*

Los defectos en la pista interna de los rodamientos de bolas y rodamientos de rodillos tienen un comportamiento similar a los defectos en la pista externa. Generan la frecuencia de paso por el aro interior (BPFI), y armónicos; el contenido de los armónicos puede ser usado para determinar el tamaño del defecto; los defectos en la pista interna de los rodamientos de bolas y rodillos generan una señal única porque los elementos rodantes que están frente a la zona de carga tienen un espacio vacío; dependiendo del tamaño del rodamiento, el espacio vacío varía de 0,003” a 0,014”, como se puede observar en la figura 4-2. La BPFI se genera solamente si el defecto está en la zona de carga durante cada revolución, puesto que, los elementos rodantes se pueden detener cuando el defecto está fuera de la zona de carga (Taylor, 2003, p. 178).

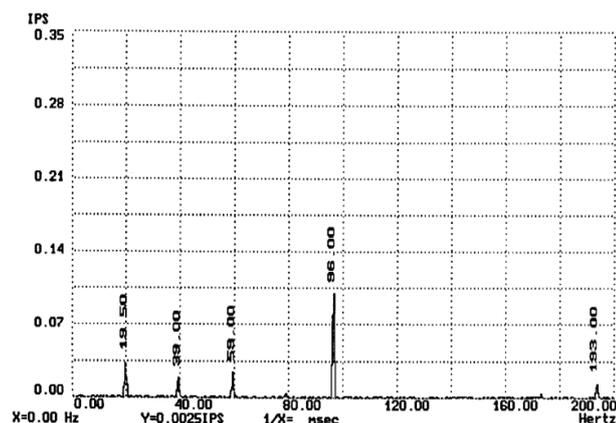


Figura 4-2: Espectro de un rodamiento con defecto de la pista interna.

Fuente: (Taylor, 2003, p. 181)

2.2.2. *Fallo en la pista externa*

Para los rodamientos de bolas y rodamientos de rodillos que tengan un ángulo de contacto, un defecto en la pista externa generará una frecuencia de paso por el aro exterior (BPFO) y armónicos. Estos armónicos son generados porque una gran área de la pista externa está en zona de carga. Cuantos más armónicos generen las picaduras por fatiga, mayor será el área de picaduras; entonces, la longitud del defecto se puede determinar por el contenido de los armónicos en el caso de picaduras poco profundas por fatiga como se puede observar en la figura 5-2. No se puede usar para picaduras profundas generadas por ácido, corrosión, y estriado (Taylor, 2003, p. 178).

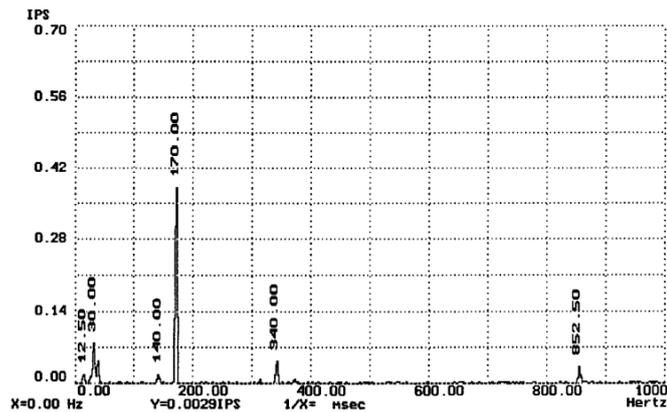


Figura 5-2: Espectro de un rodamiento con defecto en la pista externa.
Fuente: (Taylor, 2003, p. 179)

2.2.3. Fallo en el elemento rodante

Cuando un defecto en el elemento rodante golpea la pista de un rodamiento genera la frecuencia de paso de los elementos rodantes (BSF), si el elemento rodante rota de una manera que permita al defecto golpear la pista interna y externa genera dos veces la BSF; esta frecuencia se debe a condiciones mecánicas y no puede ser estimable en algunos casos. Los defectos en los elementos rodantes golpean o se agarran de la jaula sin importar de su rotación, y generan la frecuencia de paso de la jaula (FTF), esta frecuencia producida por elementos rodantes con defectos se presenta rara vez como una frecuencia discreta (Taylor, 2003, p. 186).

El valor de la raíz cuadrática media (rms) de la frecuencia generada no es muy alto porque el elemento rodante no está siempre en la zona de carga cuando el defecto golpea la pista. La BSF no puede ser generada cuando los elementos rodantes están fuera de la zona de carga, como se puede observar en la figura 6-2.

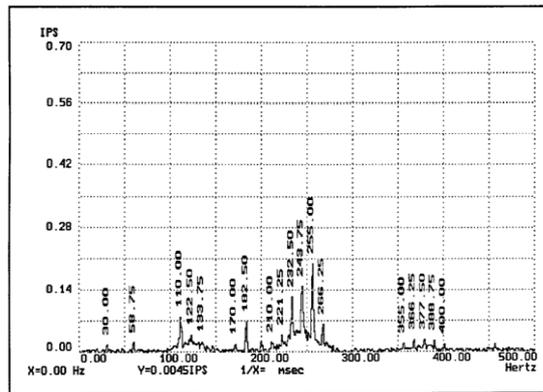


Figura 6-2: Espectro de rodamiento con defecto en las bolas.
Fuente: (Taylor, 2003, p. 186)

Cuando los elementos rodantes tienen varias picaduras, se produce un ruido de banda ancha, y aparecen defectos en la pista interna y externa; en esos casos la frecuencia de la jaula modifica la frecuencia de la pista interna y externa.

Hay tres razones por las que la frecuencia de paso de los elementos rodantes no se mide con frecuencia, primero, el elemento rodante con defecto puede rotar de tal forma que el defecto no golpee la pista; segundo, muchas veces el elemento rodante adquiere defectos a lo largo de toda o la mayoría de su superficie, y no genera la BSF, pero genera ruido por todos los defectos presentes en el área del elemento rodante; en tercer lugar, si el defecto se presenta en solo un elemento rodante, el defecto puede golpear la pista solo si el elemento rodante está en la zona de carga, lo que sucede una vez por cada revolución de la jaula. Por lo tanto, el nivel de energía generado es bastante bajo por el período de tiempo relativamente largo entre los golpes del defecto (Taylor, 2003, p. 187).

2.2.4. Desgaste de la jaula

El desgaste de la jaula produce la frecuencia de paso de la jaula (FTF), esta frecuencia no sucede muy a menudo, pero aparece cuando algunos defectos perjudican la rotación de la jaula (Taylor, 2003, p. 189).

La gran variedad de problemas que ocasionan la aparición de la FTF se deriva principalmente de la mala lubricación que se da al rodamiento y por la falta de alguno de los componentes internos del mismo tal y como se puede observar en la figura 7-2, además del ya mencionado anteriormente:

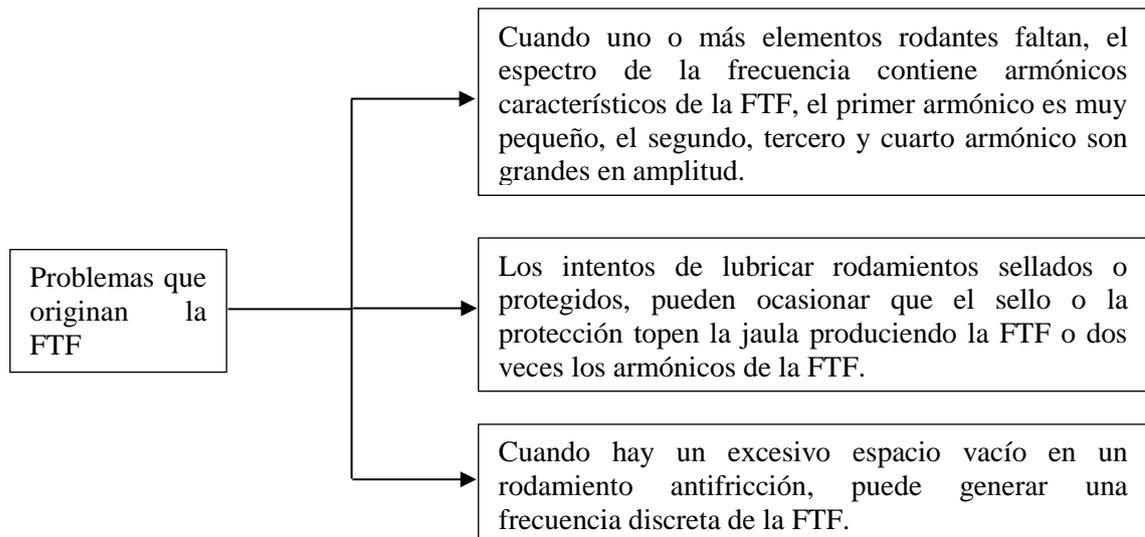


Figura 7-2: Problemas que originan la FTF.

Fuente: (Taylor, 2003, p. 189)

Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

2.3. Consecuencias de los fallos en rodamientos

Desde sus inicios, los rodamientos han ido mejorando su tecnología de fabricación y por consiguiente sus prestaciones, por lo que han logrado un muy amplio campo de aplicación en diferentes tipos de industria, con una gran confiabilidad. El nivel de servicio que puede dar el rodamiento está ligado a las condiciones de montaje, lubricación, sellado de la cámara de elementos rodantes, condiciones de servicio y ambientales (Otegui, 2015, p. 291).

La falla de los rodamientos tiene gran impacto en una planta industrial, tal como lo indican Rai y Upadhyay:

La presencia de fallos en los rodamientos tales como excoiación, picaduras, pelado, fatiga o falla de los rodamientos debido a desalineación, inclinación del eje, rugosidad de la superficie gran extensión de ondulaciones e inclusiones, etc. Provocan un colapso catastrófico del sistema, reduciendo así la confiabilidad y disponibilidad de la planta (Rai y Upadhyay, 2016, p. 2).

Es por esto que, se hace necesario diagnosticar a tiempo las fallas en los rodamientos para evitar sus consecuencias y las interrupciones en la producción. Además, podremos cumplir con las actuales exigencias de calidad, ya que, las máquinas rotativas son las responsables, en la mayoría de veces, del correcto funcionamiento del sistema productivo (Castelli y Andrade, 2007, p. 65).

A continuación, en la figura 8-2, se muestra un mapa conceptual con las consecuencias de los fallos en rodamientos:

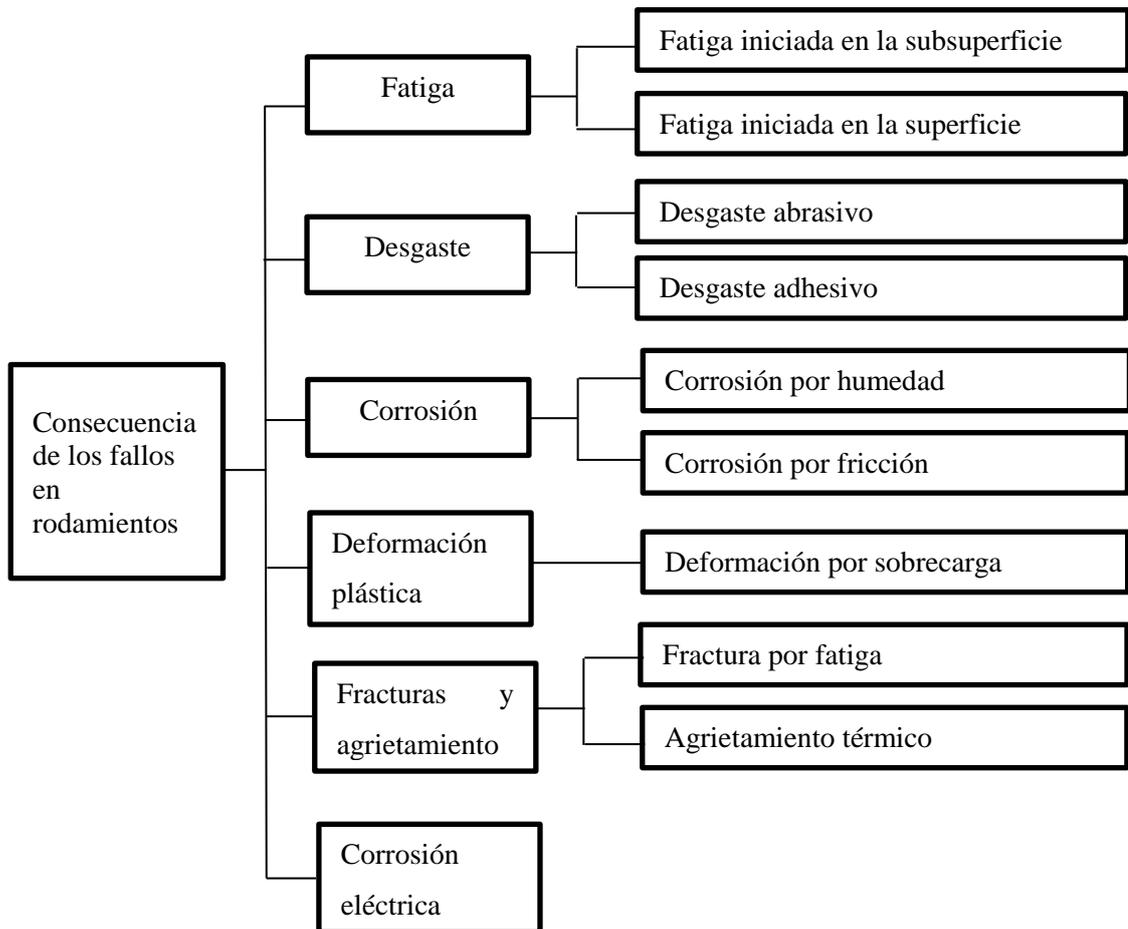


Figura 8-2: Consecuencias de los fallos en rodamientos.

Fuente: (Manual SKF, 2017; Manual FAG, 2002; Manual NSK, 2018)

Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

A continuación, se describen las consecuencias más comunes que se pueden presentar en los rodamientos

2.3.1. *Fatiga*

La fatiga es un daño permanente que ocurre luego de muchos ciclos de esfuerzos elevados de carga, por un lapso de tiempo largo que empieza como una grieta pequeña, como se muestra en la figura 9-2; prolongándose hasta generar un desprendimiento de material en la superficie, esto como resultado de esfuerzos pequeños en espacios defectuosos del elemento (Rodríguez, 2003, p. 40).



Figura 9-2: Aro interior de rodamiento de rodillos a rótula.
Fuente: (Manual SKF, 2017, p. 63)

2.3.2. *Desgaste*

El desgaste es el daño provocado a una superficie por el movimiento constante entre dos superficies. Se caracteriza por la presencia de marcas y surcos de desgaste en la jaula y elementos rodantes del rodamiento como se observa en la figura 10-2, además la grasa puede tornarse en un tono verde a causa de las partículas provenientes del desgaste de la jaula (Besa y Carballeira, 2018, p. 34).

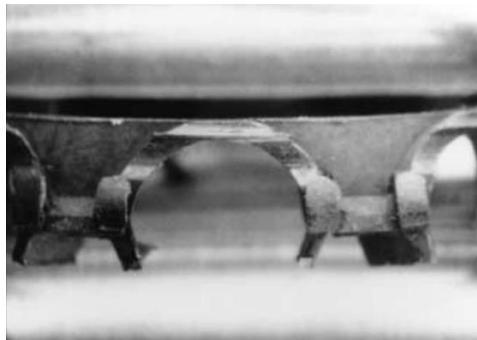


Figura 10-2: Desgaste en la superficie exterior de la jaula.
Fuente: (FAG, 2002, p. 54)

2.3.3. *Corrosión*

Se produce cuando líquidos perjudiciales para el acero del rodamiento, como agua o ácidos, entran en contacto con el mismo. Este fallo se presenta como consecuencia de defectos en la lubricación, y en los sellos del rodamiento, como se puede observar en la figura 11-2 (Besa y Carballeira, 2018, p. 36), que presenta corrosión en el anillo interior de un rodamiento de rodillos esféricos a un nivel aceptable.



Figura 11-2: Anillo interior de un rodamiento de rodillos esféricos.
Fuente: (NKS, 2021, p. 36)

2.3.4. Deformación plástica

Es la deformación en la que el rodamiento no recobra su forma original al separar la fuerza que le provoca la deformación. Puede presentarse debido a sobrecargas o deformaciones por residuos (Manual SKF, 2017, p. 56–58).

2.3.5. Fracturas y agrietamientos

Ocurren cuando el número de ciclos de flexión exceden el número de ciclos límite que resiste el acero del rodamiento. Comienzan en forma de agrietamiento y evolucionan hasta fracturar el aro del rodamiento o de la jaula, como se puede observar en la figura 12-2 (Smilovic, 2017, p. 124). Este fallo puede presentarse a más de los ya mencionado anteriormente en un rodamiento a causa de una sobrecarga

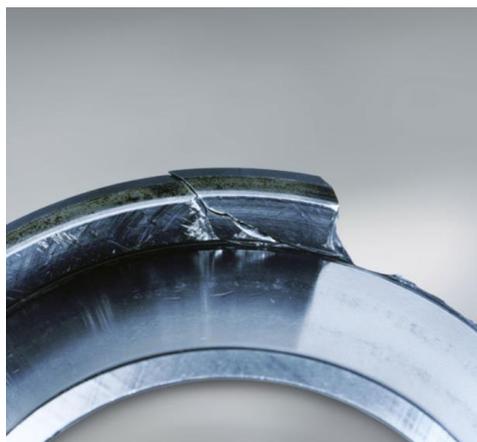


Figura 12-2: Fractura a causa de cargas en el anillo exterior.
Fuente: (NKS, 2021, p. 21)

2.3.6. Corrosión eléctrica

Cuando la corriente eléctrica fluye por un rodamiento este produce un arco eléctrico y la delgada capa de aceite en los puntos de contacto del rodamiento empiezan a unirse formando pliegues y estrías quedando en evidencia a simple vista (NSK, 2018, p. 35).



Figura 13-2: Corrosión en el anillo interior de un rodamiento.
Fuente: (NKS, 2021, p. 35)

2.4. Análisis de fallos en rodamientos

2.4.1. Componentes del espectro vibratorio

Como se puede observar en la figura 14-2, se da a conocer los componentes necesarios para poder realizar un diagnóstico correcto de la condición mecánica del rodamiento.

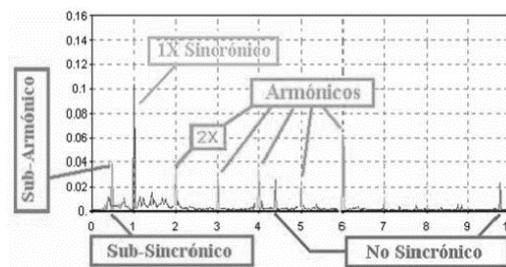


Figura 14-2: Componentes de un espectro.
Fuente: (Daza, 2007, p. 66)

2.4.2. ¿Cómo analizar un espectro vibratorio?

Para poder analizar correctamente un espectro vibratorio, debemos tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- Vincular de forma precisa la frecuencia de las vibraciones con la velocidad de rotación de la máquina.
- Las vibraciones en rodamientos se pueden generar por: vibraciones propias del funcionamiento del rodamiento, vibraciones generadas por condiciones inapropiadas de funcionamiento del rodamiento, vibraciones provenientes de otras máquinas y vibraciones generadas por fallas en el rodamiento (Daza, 2007, p. 67).

2.4.3. *Datos de vibraciones*

Los siguientes parámetros, son valores de la vibración a examinar: amplitud, frecuencia, y desfase. El valor de la amplitud determina el estado de deterioro del rodamiento, la frecuencia permite representar la causa del fallo, y el desfase permite analizar los modos de vibración (Besa y Carballeira, 2018, p. 93).

2.4.4. *Parámetros importantes para la medición de vibraciones mecánicas*

Localización de los puntos de medición:

El instrumento de medida debe estar ubicado lo más cerca posible del rodamiento, en una parte de metal sólido; y ubicado en forma radial al rodamiento, como se muestra en la figura 15-2.

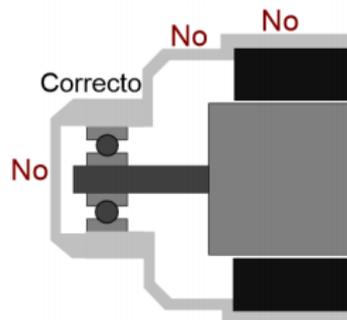


Figura 15-2: Colocación del acelerómetro.

Fuente: (Muñoz y Vera, 2015, p. 22)

Para verificar el estado de un rodamiento es necesario una medición triaxial, es decir, que se hará mediciones en tres direcciones; radial, axial y tangencial al rodamiento en cada punto de medición; cómo se puede observar en la figura 16-2.

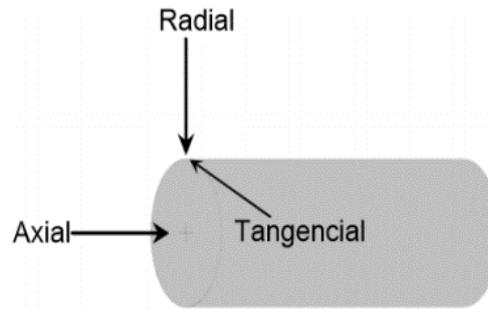


Figura 16-2: Dirección de las mediciones.
Fuente: (Muñoz y Vera, 2015, p. 23)

2.4.5. *Análisis en el dominio del tiempo*

Los análisis de la señal de vibración en el dominio del tiempo utilizan la señal de aceleración para obtener los datos de prueba como: el valor rms, el factor de cresta, y la curtosis de la señal (Moreno, 2018, p. 31).

Esta metodología es útil para identificar fallos en los rodamientos, pero no se utiliza mucho en la industria, porque no permite la identificación de la ubicación del defecto. Comparando los valores rms con valores recomendados se puede determinar la condición de un rodamiento (Patidar y Soni, 2013, p. 1806).

2.4.6. *Análisis en el dominio de la frecuencia*

Para evitar las limitaciones del análisis de la forma de onda, lo más común es llevar a cabo un análisis de frecuencias, conocido también como análisis de espectro de la señal de vibración. La gráfica en el dominio del tiempo se llama “forma de onda”, y la gráfica en el dominio de la frecuencia se llama “espectro” (White, 2010, p. 32).

En la siguiente figura 17-2, se muestra como en el espectro los componentes son distintivos lo que los hace diferentes uno del otro y sus niveles se pueden identificar con facilidad; lo que en la forma de onda sería difícil de identificar.

La transformada de Fourier es una de las varias herramientas que permite convertir una señal de onda representada en el dominio del tiempo a una señal de onda representada en el dominio de la frecuencia.

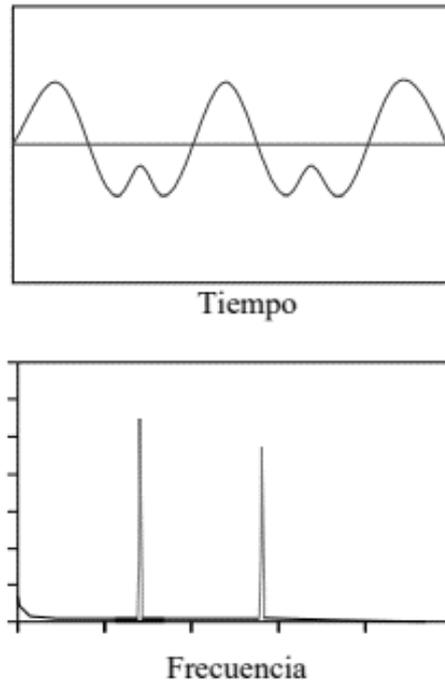


Figura 17-2: Dominio de tiempo vs. Dominio de frecuencia.
Fuente: (White, 2010, p. 33)

2.4.6.1. *La transformada discreta de Fourier (TDF)*

Era conocida en teoría desde hace muchos años, pero se la puso en práctica solo con la llegada de la computadora digital. La TDF trabaja con señales de muestras en el dominio del tiempo, a partir de esto, se genera un espectro de muestras en el dominio de la frecuencia (Muñoz y Vera, 2015, p. 28).

Si el tamaño del muestreo representa en su mayoría la forma de la señal, la TDF produce un espectro similar a uno teóricamente verdadero, el cual no brinda información entre las líneas del espectro.

2.4.6.2. *La transformada rápida de Fourier (TRF)*

Fue desarrollada para adaptar el uso de la TDF en computadoras digitales. Es un algoritmo para calcular la TDF de manera rápida y eficaz.

Tiene algunas limitaciones en la señal y en el espectro resultante. El rango de frecuencias cubierto por el análisis TRF depende de la cantidad de muestras recogidas y de la proporción de muestreo. Es uno de los mayores desarrollos en el tratamiento digital de señales, filtrado digital, y resolución de ecuaciones diferenciales (Gonzalez y Quispe, 2015, p. 21).

2.4.6.3. *La transformada inversa rápida de Fourier (IFFT)*

Es un método rápido de cálculo de la TDF, tal como lo indican Xu et al. (2018, p. 10) “la IFFT es rápida para el cálculo de componentes de tendencia tiene ventajas obvias sobre la tradicional transformada de ondas empíricas con respecto a señales analógicas y prácticas” además, Santamaría, Pantaleón e Ibañez (2000, p. 820), señalan que “el método de la IFFT tiene ventajas de ser fácil de implementar y muy rápida. Sin embargo, cuando las sinusoides no están bien separadas en frecuencia, sus resultados no son muy precisos”.

2.5. Mecanismos de fallos en rodamientos

Los mecanismos que pueden provocar un mal funcionamiento son varios, y cada uno de ellos pueden manifestarse según múltiples síntomas; por este motivo, es importante conocer bien los mecanismos de fallo para conocer los problemas que provocan el mal funcionamiento (Sánchez et al., 2013, p. 152). Los mecanismos de fallo se pueden agrupar en las siguientes categorías:

2.5.1. *Defectos por obturaciones*

Incluye todas las causas de mal funcionamiento relacionadas con las obturaciones es decir al ingreso de cuerpos extraños, como pequeñas partículas metálicas y de la humedad, como se muestra en la figura 18-2.

Hay que diferenciar entre obturaciones propias del rodamiento y obturaciones exteriores al rodamiento provocadas por lo mencionado anteriormente.



Figura 18-2: Daños superficiales producto de la acción de residuos.
Fuente: (Carrillo, 2013, p. 20)

2.5.2. Defectos en la lubricación

Incluye todos los defectos en el funcionamiento, como se puede evidenciar en la figura 19-2, derivados de una u otra forma de la existencia de fallos en la lubricación del rodamiento (Sánchez et al., 2013, p. 152).

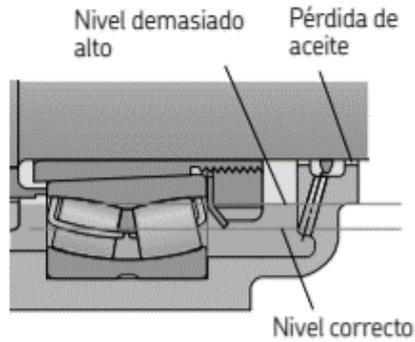


Figura 19-2: Lubricante excesivo.
Fuente: (Manual SKF, 2017, p. 14)

2.5.3. Juego insuficiente

Diferentes causas pueden producir la existencia de un juego insuficiente en el interior del rodamiento, que acortará sensiblemente su vida útil, esto se muestra en la figura 20-2 (Sánchez et al., 2013, p. 152).

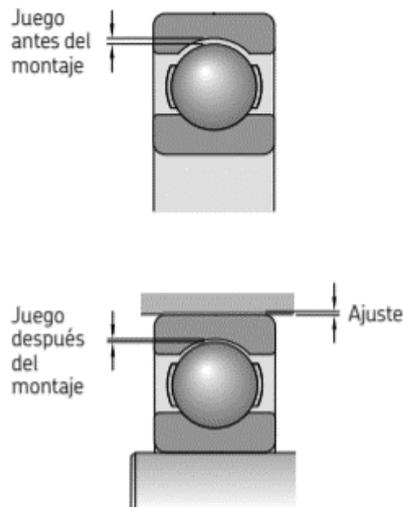


Figura 20-2: Ajuste excesivo del soporte.
Fuente: (Manual SKF, 2017, p. 20)

Si el ajuste es apretado puede generar un juego insuficiente, lo que ocasionará una alta temperatura de trabajo en el rodamiento.

2.5.4. Elementos incorrectos o deformados

Cuando los elementos del rodamiento o los elementos externos al mismo que están directamente relacionados con él están deformados, el funcionamiento del rodamiento no es adecuado como se puede observar en la figura 21-2, donde se muestra una deformación en el aro exterior del rodamiento (Sánchez et al., 2013, p. 152).

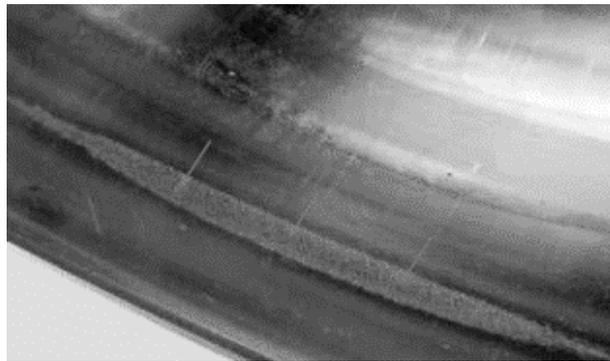


Figura 21-2: Aro exterior de rodamiento de rodillos a rótula.
Fuente: (Manual SKF, 2017, p. 75)

2.5.5. Interferencia entre elementos

Hace referencia a todas las situaciones en las que dos elementos con movimiento relativo, no preparados para ello, contactan directamente produciéndose fricción y desgaste como se observa en la figura 22-2, que muestra una huella de desgaste en la superficie del elemento rodante (Sánchez et al., 2013, p. 152).



Figura 22-2: Huella de desgaste en la superficie del elemento rodante.
Fuente: (Carrillo, 2013, p. 19)

2.5.6. Defectos externos del rodamiento

Algunos defectos de la máquina, que son externos al rodamiento, tales como el desequilibrio o la desalineación, tal y como se evidencia en la figura 23-2, provocando el mal funcionamiento del rodamiento (Sánchez et al., 2013, p. 153).

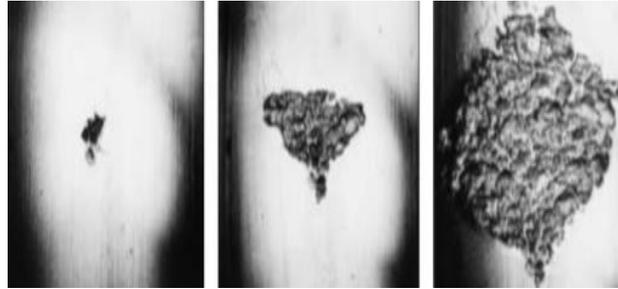


Figura 23-2: Falla por fatiga producto de contacto con impurezas.
Fuente: (Carrillo, 2013, p. 16)

2.6. Diagnóstico de los fallos en rodamientos

2.6.1. Elaborar tendencias

Consiste en almacenar las firmas obtenidas a tiempos específicos y de apuntar los cambios en los niveles de vibración a las frecuencias forzadas vs tiempo. Una tendencia creciente en el nivel, indica un problema incipiente (White, 2010, p. 11).

Contempla dos etapas, la primera consiste en la detección del problema, para lo cual debemos definir un espectro de referencia, que es el espectro de vibración de un rodamiento operando normalmente; con este espectro se compararán las mediciones futuras realizadas en el mismo rodamiento y en el mismo punto de medición, pudiéndose detectar si alguno de los componentes de frecuencia ha incrementado su amplitud hasta niveles no permisibles. La siguiente etapa es la identificación, en donde se toma como punto de inicio las mediciones anteriores y se inicia una investigación para identificar dónde está localizado y cuál es el problema que ha producido un exceso en los niveles de vibraciones registrados (Palomino, 2007, p. 108).

A partir de un espectro de un rodamiento en condición normal, se puede identificar el punto en el que empezó aparecer una falla, debido a la variación de las amplitudes de las frecuencias.

Es necesario realizar un promedio de varios espectros instantáneos, para reducir las variaciones aleatorias y ruido extraño en las señales medidas; la cantidad de promedios espectrales deben ser suficientes para producir un espectro de la señal de vibración uniforme y constante. Por lo general de seis a diez promedios son suficientes, pero puede variar si en el rodamiento el contenido de ruido aleatorio es relativamente alto. Si hay una diferencia importante entre los espectros la cantidad de promedios se debe duplicar. En el caso de tener un número de máquinas similares, para obtener su estado general se debe realizar un promedio estadístico de sus espectros de referencia. Una serie de máquinas en buen estado de funcionamiento producirán espectros de vibración similares los unos a los otros, pero con variaciones aleatorias en nivel. “Se hace el promedio de los espectros de las máquinas y se calcula las desviaciones estándar de nivel a cada frecuencia importante” (White, 2010, p. 78).

Se debe relacionar los espectros medidos con el espectro de referencia, es decir, los cambios relativos que sufren los niveles de vibraciones con respecto a los espectros de referencia nos ayudan a estimar el mejor indicador de la condición mecánica del rodamiento (Palomino, 2007, p. 109).

2.6.2. Cálculo de las frecuencias generadas por rodamientos con defectos

Se pueden plantear las siguientes expresiones, para el cálculo de estas frecuencias:

Frecuencia de la pista interna

$$BPFI = \frac{Nb}{2} \left(1 + \frac{Bd}{Pd} \cos \theta \right) * \text{Frecuencia fundamental} \quad (1)$$

Frecuencia de la pista externa

$$BPFO = \frac{Nb}{2} \left(1 - \frac{Bd}{Pd} \cos \theta \right) * \text{Frecuencia fundamental} \quad (2)$$

Frecuencia de giro de bola/rodillo

$$BSF = \frac{Pd}{2Bd} \left\{ 1 - \left[\left(\frac{Bd}{Pd} \right)^2 (\cos \theta)^2 \right] \right\} * \text{Frecuencia fundamental} \quad (3)$$

Frecuencia fundamental de jaula

$$FTF = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cos \theta \right) * \text{Frecuencia fundamental} \quad (4)$$

Donde se define:

B_{PI} como frecuencia de la pista interna, **B_{PE}** como frecuencia de la pista externa, **BSF** como frecuencia de giro de bola, **FTF** como frecuencia fundamental de la jaula, **B_d** como diámetro de la bola, **P_d** como el módulo de rodamiento, **N_b** como el número de elementos rodantes, y **θ** como el ángulo de contacto.

2.6.3. *Desgaste en rodamientos*

Para el análisis del desgaste de los rodamientos es preciso estudiar las concentraciones de esfuerzo que ocurren en la zona de contacto entre los elementos rodantes y las pistas; cualquier fuerza externa que aumente los esfuerzos de contacto en la superficie o cerca de esta será un elemento que dé inicio a una falla (El-Thalji y Jantunen, 2015, p. 92).

Las primeras fallas en rodamientos generan frecuencias de vibración no sincrónicas indicativas llamados también “tonos de rodamientos”, y sus armónicos. Los tonos de rodamientos también se pueden dar debido a daños durante la instalación o el transporte, o defectos de manufactura.

2.6.4. *Bandas laterales*

Es producido por un defecto en el aro interior, el cual modula en amplitud los tonos de rodamiento produciendo bandas laterales alrededor de los tonos del rodamiento, a una distancia de 1x. El defecto en el aro interior entra y sale de la zona de carga, produciendo vibración a la frecuencia del paso de bolas y muy poca vibración respectivamente. La frecuencia rotatoria de bandas laterales ocurrirá en el espectro de envolvente en adición a la frecuencia característica de falla. La aparición de bandas laterales incrementará la dificultad del diagnóstico de fallas (Cong et al., 2013, p. 2081).

Un defecto en el elemento rodante puede causar bandas laterales, debido a que, el defecto entrará y saldrá de la zona de carga al mismo tiempo de la FFT.

2.6.5. *Rodamientos con elementos rodantes desalineados*

En el caso de tener un elemento rodante chueco dentro del rodamiento, este generará tonos de rodamiento fuertes, y altos niveles de $1x$ y $2x$ en el espectro de vibración, en dirección axial la mayoría de veces, pero también puede tener dirección radial tal y como se muestra en la figura 24-2 (White, 2010, p. 116).

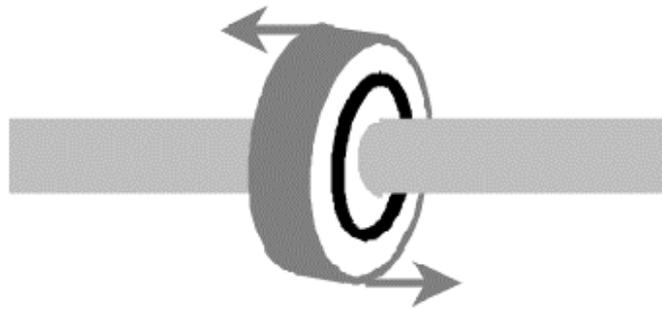


Figura 24-2: Rodamiento chueco.
Fuente: (White, 2010, p. 116)

2.6.6. *Holgura de rodamientos*

La holgura es producida por un juego excesivo en el rodamiento, provocando a demás armónicos $1x$. Por otra parte, la holgura extrema produce componentes de medio orden, en múltiplos de $0,5x$. El centro de la pista interior cambia de posición vertical, de acuerdo con la posición de los elementos rodantes. La frecuencia de la oscilación generada en la pista interior será igual a la frecuencia de paso de los elementos rodantes por un punto fijo de la pista (Besa y Carballeira, 2018, p. 161).

La holgura mecánica se clasifica en: holgura rotativa y no rotativa. La holgura rotativa es consecuencia de un juego excesivo entre la parte fija y la parte móvil de un rodamiento. La holgura no rotativa se produce entre dos partes de una máquina que normalmente son estáticas.

2.6.7. *Estimación de la gravedad de la vibración*

Una vez identificado el fallo del rodamiento por su firma de vibración, se debe determinar el estado del rodamiento, esto se realiza con mayor efectividad comparando una serie de mediciones de vibraciones hechas en un largo tiempo. Las normas se pueden usar como guía si no hay datos históricos (Palomino, 2007, p. 109).

Algunas de las normas y guías que se usan generalmente son:

Carta de Rathbone

Esta carta fue creada para máquinas de bajo rpm con ciertas restricciones como, por ejemplo: es de uso exclusivo para maquinaria rotativa que no toma en cuenta la potencia ni rigidez de sus equipos dando como resultado valores básicos y no tan definidos (Velarde, 2014 p. 33).

Norma ISO 2372

Es aplicable en equipos rotatorios donde el rango de velocidad de giro no debe superar los 600 y 12000 rpm, define los límites de velocidad de vibración dependiendo de la fuerza con la que actué la máquina, con un rango de frecuencia entre los 10 Hz a 1000 Hz (Ojeda, 2010 p. 16).

Norma ISO 10816

Esta norma proporciona las guías específicas para la evaluación de severidad de vibración medidas en apoyos, montajes o soportes de máquinas industriales (Ojeda, 2010 p. 19).

2.7. Etapas de los fallos de los rodamientos

Los rodamientos son elementos mecánicos que experimentan síntomas durante el desarrollo de una falla. El desarrollo de la falla está dividido en 4 etapas que se describen a continuación:

2.7.1. Primera etapa

Durante esta etapa, el rodamiento no emitirá ruidos extraños ni la temperatura aumenta, por lo que se necesita de instrumentos electrónicos para su detección. El rodamiento presenta hoyos y grietas de tamaño reducido, hasta el punto de que no son visibles, por lo que en el espectro de la frecuencia se podrá observar armónicos superiores a 5 kHz, como se puede observar en la figura 25-2. Los golpes pequeños entre los elementos rodantes y el eje, en el que se encuentra el rodamiento, pueden generar los mismos armónicos, por tanto, se considera como normal la operación del rodamiento, y no se requiere un cambio inmediato (Blanco y Melgarejo, 2021, p. 38).

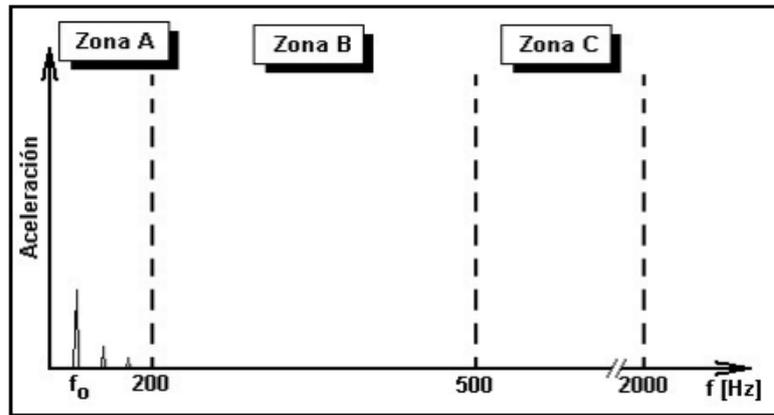


Figura 25-2: Etapa inicial de evolución del defecto
Fuente: (Palomino, 2007, p. 162)

Algunos de los instrumentos electrónicos diseñados para detectar estas frecuencias son:

- Unidad de estado del rodamiento (BCU)
- Detección de envolvente
- Tecnología de energía espectral emitida (SEE)

2.7.2. Segunda etapa

A medida que el defecto en el rodamiento aumenta, se hace visible, y cada vez que los elementos rodantes pasen por este, generarán frecuencias de resonancia, que son lo suficientemente grandes para hacer sonar al rodamiento como una campana, y en algunos casos la temperatura del rodamiento aumenta. Empieza a aparecer armónicos en la zona III, como lo muestra la figura 26-2, es decir, que el rodamiento está trabajando en frecuencias naturales, por lo que el cambio inmediato del rodamiento no es necesario, pero se debe programar el cambio en máquinas críticas (Blanco y Melgarejo, 2021, p. 39).

En la tabla 1-2, se muestra algunos rangos de frecuencias de resonancia, relacionados con el tipo y la aplicación de los rodamientos:

Tabla 1-2: Frecuencias de resonancia

Tipo y aplicación	Frecuencias de resonancia (Hz)
Convencionales	500 - 1500
Alta precisión	1250 - 2000
Para máquinas herramientas	2500 - 3000

Fuente: (Palomino, 2007, p. 163)

Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

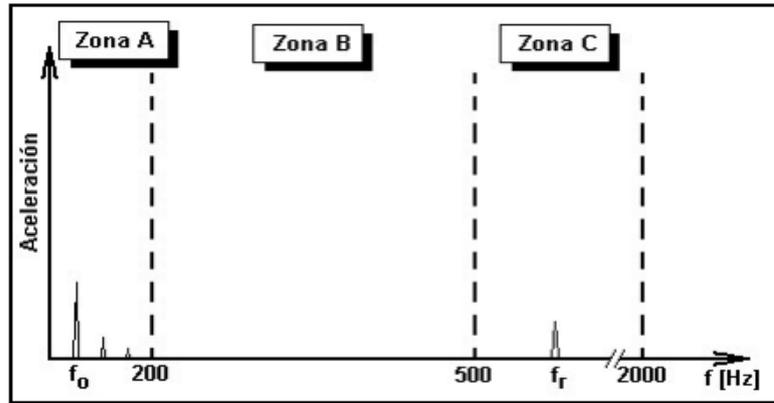


Figura 26-2: Etapa desarrollo del defecto.

Fuente: (Palomino, 2007, p. 163)

2.7.3. Tercera etapa

En esta etapa las grietas en las pistas aumentan de tamaño, y afectan a los elementos rodantes, las grietas son claramente notorias. Aparecen vibraciones con componentes en frecuencias comunes, que crecerán de forma lineal con el tiempo tales como BPFO o BPFI, como lo muestra la figura 27-2, además estas frecuencias nos permiten hacer un diagnóstico del rodamiento, para poder programar el cambio de rodamiento de la máquina (Blanco y Melgarejo, 2021, p. 39).

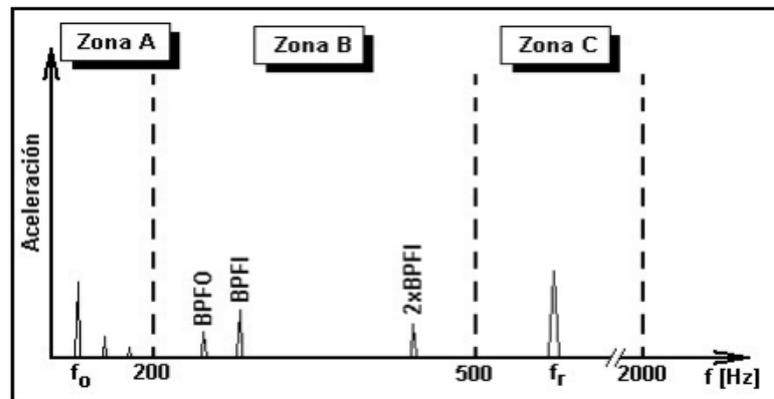


Figura 27-2: Etapa crisis del rodamiento.

Fuente: (Palomino, 2007, p. 164)

2.7.4. Cuarta etapa

En esta etapa se observa una vibración aleatoria de muy alta frecuencia, provocando un incremento de las amplitudes de la frecuencia fundamental y sus armónicos, es decir, el rodamiento ha llegado al final de su vida útil (Blanco y Melgarejo, 2021, p. 39).

Se indica que a partir de esta etapa la vida útil del rodamiento es de una hora, lo que a nivel industrial es prácticamente imposible de pronosticar. Es decir que, solo es posible realizar el diagnóstico del estado de los rodamientos hasta la tercera etapa de fallo del rodamiento, como se observa en la figura 28-2.

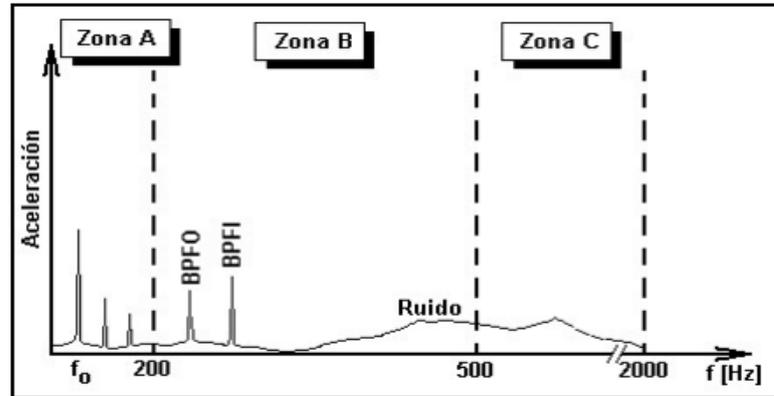


Figura 28-2: Etapa de fallo inminente del rodamiento.
Fuente: (Palomino, 2007, p. 164)

CAPÍTULO III

3. IMPLEMENTACIÓN DEL MÓDULO DE SIMULACIÓN

En este capítulo se elaborará una lista con los principales fallos en los rodamientos y sus consecuencias, se dará a conocer las características técnicas del motor eléctrico, y se realizará el procedimiento para la selección de los elementos mecánicos que conformarán el módulo de simulación de fallas en rodamientos. Teniendo los elementos mecánicos seleccionados, se delinearé el módulo de simulación en SolidWorks Académico, para con esto, proceder a su construcción, y realizar las respectivas pruebas de funcionamiento.

3.1. Lista de los principales fallos y sus consecuencias

Como se puede observar en la tabla 1-3, se describen los principales fallos y consecuencias que se presentan en los rodamientos.

Tabla 1-3: Principales fallos en rodamientos y sus consecuencias

Parte del rodamiento	Fallo	Causa que lo provoca	Consecuencia
Pista interna	Fatiga a consecuencia de rodadura sobre cuerpos extraños	<ul style="list-style-type: none"> • Presencia de Impurezas • Limaduras de hierro • Raspaduras de rectificado 	<ul style="list-style-type: none"> • Picaduras en V • Incrustaciones
	Contaminación abrasiva	<ul style="list-style-type: none"> • Arena • Metal fino producto del pulido • Metal o carburos finos de engranajes en pistas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Abolladuras • Rayado circunferencial (ranurado) • Micro cráteres
Elemento rodante	Sobrecarga	<ul style="list-style-type: none"> • Punzones • Golpes directos 	<ul style="list-style-type: none"> • Ralladura • Descascarillado
	Lubricación inadecuada	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de lubricante • Degradación de lubricante 	<ul style="list-style-type: none"> • Decoloración • Ralladuras • Descascarillado
	Desalineación	<ul style="list-style-type: none"> • Maquinado fuera de forma de asientos 	<ul style="list-style-type: none"> • Deformación • Desgaste prematuro
Jaula	Corrosión	<ul style="list-style-type: none"> • Humedad o agua • Sellos desgastados 	<ul style="list-style-type: none"> • Manchado • Descascarillado
	Quemaduras por corriente eléctrica	<ul style="list-style-type: none"> • Voltaje excesivo • Arco eléctrico 	<ul style="list-style-type: none"> • Picaduras • Estrías
Pista externa	Corrosión por picaduras	<ul style="list-style-type: none"> • Virutas metálicas • Arena • Suciedad de piezas 	<ul style="list-style-type: none"> • Abolladuras • Picaduras • Descascarado prematuro
	Ranurado	<ul style="list-style-type: none"> • Virutas metálicas • Partículas de metal de gran tamaño. 	<ul style="list-style-type: none"> • Estrías • Geometría de contacto de rodadura inadecuado.

Fuente: (Manual Timken, 2015; Manual FAG, 2002; Manual SKF, 2017; Manual NSK, 2018)

Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

3.2. Diseño del módulo de simulación de fallas en rodamientos

3.2.1. Selección del tipo de acero para la estructura del módulo

Antes de seleccionar el tipo de acero para la construcción de la estructura del módulo, se debe considerar los siguientes factores tal y como se muestra en la tabla 2-3:

Tabla 2-3: Factores básicos a considerar en la selección de materiales

Factores físicos	Tamaño, forma, peso del módulo, y espacio disponible para el componente.
Factores mecánicos	Capacidad del material para soportar diferentes tipos de esfuerzos.
Procesamiento	Capacidad de dar forma al material.
Duración de los componentes	Tiempo durante el cual los materiales desempeñan las funciones a las que han sido destinados, y el ambiente al que van a estar expuestos.

Fuente: (Gómez, 2017, p. 7)

Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

El acero AISI SAE 1020, es de bajo contenido en carbono, de fácil mecanizado y una buena soldabilidad, se lo utiliza en la fabricación de piezas estructurales y de maquinaria, es de resistencia media, con una gran tenacidad.

Las propiedades mecánicas existentes del acero AISI SAE 1020 son las adecuadas para la construcción de la estructura del módulo de simulación, fácil de mecanizar, además de tener una alta resistencia a la tracción y una dureza de 150 HB. Además, al terminar la construcción del módulo, este será de fácil movilidad.

3.2.2. Especificaciones del motor eléctrico

Debido a que el módulo de simulación vibracional va a trabajar sin carga alguna, se tomó como referencia el motor existente en el laboratorio de diagnóstico técnico. Las características que presenta el motor eléctrico para que pueda cumplir con su trabajo, se muestra en la tabla 3-3:

Tabla 3-3: Datos técnicos del motor WEG W22 IE2

WEG - W22 IE2	
Potencia	0,5 hp
Frecuencia	60 Hz
Rotación nominal	1700 rpm
Tensión nominal	220/240 V
Torque nominal	1,53 ft*lb
Dirección de rotación	Ambos

Fuente: (Catálogo de motores WEG, p. 44)

Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

3.2.3. Dimensionamiento del eje principal

Como se puede observar en la figura 1-3, se evidencia la disposición de los elementos montados en el módulo de simulación.

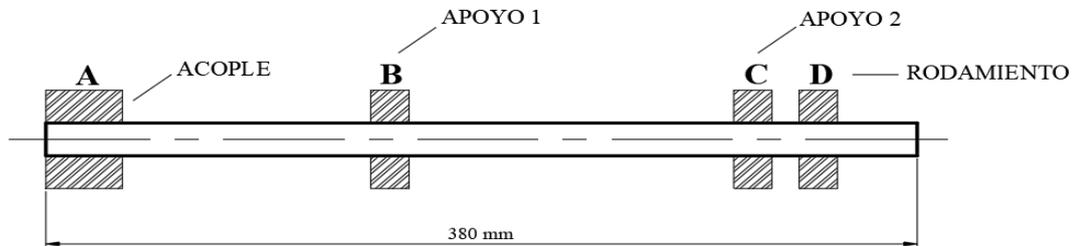


Figura 1-3: Disposición de los rodamientos y acople.

Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

- El eje se va a maquinar en acero AISI 1144, para transmisión.
- El motor al que va a estar acoplado el eje es de 1700 rpm y 0.5 hp.

Propiedades del acero para el eje

A partir del gráfico 1-3, podemos determinar algunas propiedades del acero AISI 1144 como son:

- Punto de fluencia
- Resistencia a la tensión
- Resistencia a la fatiga

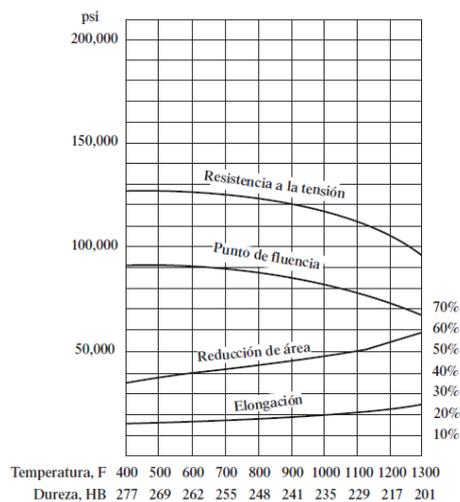


Figura 2-3: Propiedades del acero AISI 1144.

Fuente: (Mott, 2006)

Utilizando un porcentaje de elongación del 19%, se obtiene las siguientes propiedades las cuales se pueden observar en el gráfico 2-3, que se muestra a continuación:

- Punto de fluencia: $S_y = 85000$ psi
- Resistencia a la tensión: $W_u = 120000$ psi
- Resistencia a la fatiga: $S_n = 44000$ psi

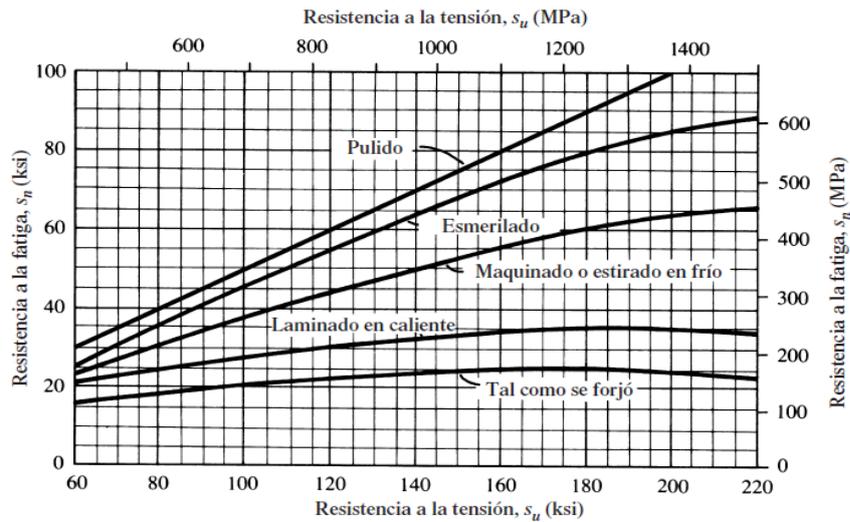


Figura 3-3: Resistencia a la fatiga, en función de la resistencia a la tensión.
Fuente: (Mott, 2006, p.175)

3.2.3.1. Factor por tamaño a la resistencia de fatiga

Utilizando la tabla 4-3, que se puede observar a continuación determinaremos el factor de tamaño (C_s) estimado:

Tabla 4-3: Factores de tamaño

Unidades SI	
Rango de tamaño	Para D en mm
$D \leq 7,62$	$C_s = 1,0$
$7,62 < D \leq 50$	$C_s = (D/7,62)^{-0,11}$
$50 < D < 250$	$C_s = 0,859 - 0,000837(D)$

Fuente: (Mott, 2006, p. 175)

Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

$$7,62 < D \leq 50$$

$$C_s = \left(\frac{D}{7,62} \right)^{-0,11} \quad (5)$$

$$C_s = \left(\frac{20 \text{ mm}}{7,62} \right)^{-0,11}$$

$C_s = 0,9$ (Como una estimación)

Factor de confiabilidad aproximado

Mediante la tabla 5-3, determinamos el factor de confiabilidad deseado necesario para establecer la resistencia a la fatiga.

Tabla 5-3: Factores de confiabilidad aproximados C_r

Confiabilidad deseada	C_r
0,50	1,0
0,90	0,90
0,99	0,81
0,999	0,75

Fuente: (Mott, 2006, p. 175)

Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

Confiabilidad deseada = 0,99

$C_R = 0,81$

Resistencia a la fatiga modificada

$$S'_n = (S_n) * (C_s) * (C_r) \quad (6)$$

$$S'_n = (44000 \text{ psi}) * (0,9) * (0,81)$$

$$S'_n = 32076 \text{ psi} = 221,16 \text{ MPa}$$

Par torsional en el eje

$$T = \frac{63000 * \text{Potencia}}{\text{rpm}} \quad (7)$$

$$T = \frac{63000 * 0,5 \text{ hp}}{1700 \text{ rpm}}$$

$$T = 18,5 \text{ lb.pulg} = 2,03 \text{ Nm}$$

Factor de diseño

$$N = 2$$

Cálculo de los diámetros del eje

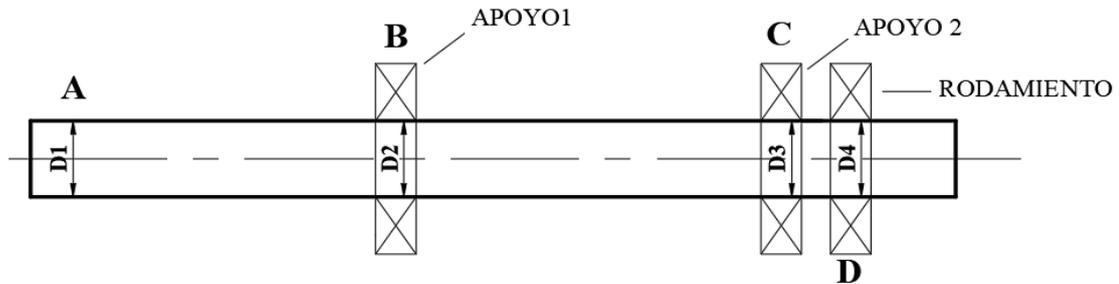


Figura 4-3: Diámetros propuestos para el eje.

Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

A la izquierda de B, donde está situado el acople, como se muestra en la figura 2-3, no existe fuerzas, ni flexión, motivo por el cual el momento flexionante en A es cero, y debido también a que es un extremo libre del eje. Para calcular el diámetro requerido del eje en el punto A, se utilizará la siguiente ecuación:

$$D_1 = \left[\frac{32 * N}{\pi} \sqrt{\frac{3}{4} \left(\frac{T}{S_y} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

$$D_1 = \left[\frac{32 * 2}{\pi} \sqrt{\frac{3}{4} \left(\frac{18,5 \text{ lb} * \text{pulg}}{85000 \text{ psi}} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$D_1 = 0,16 \text{ pulg}$$

En los puntos B, y C solo existe par torsional, y los momentos flexionantes son iguales a cero, o son muy bajos; debido a que el módulo de simulación de fallas en rodamientos trabaja sin carga.

Además, estos puntos están sujetos por rodamientos y solo están sometidos a torsión propio del eje. Utilizamos la ecuación (8) para el cálculo del diámetro del eje en el punto B y C:

$$D_2 = \left[\frac{32*N}{\pi} \sqrt{\frac{3}{4} \left(\frac{T}{S_y} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

$$D_2 = \left[\frac{32*2}{\pi} \sqrt{\frac{3}{4} \left(\frac{18,5 \text{ lb*pulg}}{85000 \text{ psi}} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$\mathbf{D_2 = 0,16 \text{ pulg}}$$

$$D_3 = \left[\frac{32*N}{\pi} \sqrt{\frac{3}{4} \left(\frac{T}{S_y} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

$$D_3 = \left[\frac{32*2}{\pi} \sqrt{\frac{3}{4} \left(\frac{18,5 \text{ lb*pulg}}{85000 \text{ psi}} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$\mathbf{D_3 = 0,16 \text{ pulg}}$$

En el punto D se encuentra el rodamiento en el que se realizarán las simulaciones de fallas, y es por ello, recomendable que D_4 sea igual que D_3 , para facilitar la mecanización del acero. Aplicamos la ecuación (8), nuevamente para calcular el diámetro del eje en el punto D_4 :

$$D_4 = \left[\frac{32*N}{\pi} \sqrt{\frac{3}{4} \left(\frac{T}{S_y} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

$$D_4 = \left[\frac{32*2}{\pi} \sqrt{\frac{3}{4} \left(\frac{18,5 \text{ lb*pulg}}{85000 \text{ psi}} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$\mathbf{D_4 = 0,16 \text{ pulg}}$$

Los diámetros mínimos calculados que se requieren para las diversas partes del eje, son las siguientes:

$$D_1 = 0,16 \text{ pulg} = 4,064 \text{ mm}$$

$$D_2 = 0,16 \text{ pulg} = 4,064 \text{ mm}$$

$$D_3 = 0,16 \text{ pulg} = 4,064 \text{ mm}$$

$$D_4 = 0,16 \text{ pulg} = 4,064 \text{ mm}$$

Tomando como referencia el diámetro del eje del módulo de simulación de fallas en rodamientos del laboratorio de diagnóstico técnico y eficiencia energética, se consideró que el diámetro que se va a utilizar para el eje será de $\frac{3}{4}$ pulg. Considerando el tipo de rodamiento para las diferentes pruebas en el módulo de simulación, se construirá un bocín con un prisionero para ajustar el rodamiento con el eje en el punto D.

3.2.4. Selección de rodamientos en los puntos B, C y D

Datos:

- Diámetro interior mínimo: **19,05 mm**
- Duración de diseño: **30000 h** (para motores eléctricos)
- Velocidad de giro del eje: **1700 rpm**
- Constante **K=3** (para rodamientos de bolas)

Se va a suponer una carga radial de 150 lb, debido a que el módulo de simulación de fallas en rodamientos trabajará sin carga.

Carga de diseño P_d

$$P_d = V * R \tag{9}$$

Donde:

- V = Factor de rotación (1, si gira la pista interior)
- R = carga radial

$$P_d = V \cdot R$$

$$P_d = 1 \cdot 150 \text{ lb}$$

$$P_d = 150 \text{ lb} = 667,23 \text{ N}$$

Duración de diseño (L_d)

$$L_d = (h) \cdot (\text{rpm}) \cdot \left(60 \frac{\text{min}}{h}\right) \quad (10)$$

$$L_d = (30000 \text{ h}) \cdot (1700 \text{ rpm}) \cdot \left(60 \frac{\text{min}}{h}\right)$$

$$L_d = 3,06 \times 10^9 \text{ rev}$$

Capacidad de carga dinámica básica (C)

$$C = P_d \cdot \left(\frac{L_d}{10^6}\right)^{\frac{1}{k}} \quad (11)$$

$$C = 150 \text{ lb} \cdot \left(\frac{3,06 \times 10^9}{10^6}\right)^{\frac{1}{3}}$$

$$C = 2177,7 \text{ lb}$$

$$C = 9,68 \text{ kN}$$

Se han transformado las unidades de algunos valores calculados para coincidir con la norma INEN, la cual utiliza unidades del sistema internacional. Esto se realizó para que los cálculos realizados sean comprensibles para las personas que trabajen con el sistema internacional de unidades.

De acuerdo con la capacidad de carga dinámica básica requerida, se encontró que para el punto B, la unidad de rodamiento de bolas SKF SYK 20 TF, que tiene una C nominal mayor a 9.68 kN, como se muestra en la figura 3-3, además, concuerda con el tamaño deseado del eje.

Dimensions														Basic load ratings		Fatigue load limit	Limiting speed with shaft tolerance h6	Designation
d	A	A ₁	B	H	H ₁	H ₂	J	L	N	N ₁	G	s ₁	dynamic C	static C ₀	P _u	r/min	Bearing unit	
mm													kN		kN		-	
20	32	21	31	64	33,3	16	96	126	17,5	12	10	18,3	12,7	6,55	0,28	8 500	SYK 20 TF	
	32	21	31	64	33,3	16	96	126	17,5	12	10	18,3	12,7	6,55	0,28	5 000	SYK 20 TR	
25	32	22	34,1	70,5	36,5	16	105	134	17,5	12	10	19,8	14	7,8	0,335	7 000	SYK 25 TF	
	32	22	34,1	70,5	36,5	16	105	134	17,5	12	10	19,8	14	7,8	0,335	4 300	SYK 25 TR	
30	40	25	38,1	82	42,9	19	121	159	21,5	14,5	12	22,2	19,5	11,2	0,475	6 300	SYK 30 TF	
	40	25	38,1	82	42,9	19	121	159	21,5	14,5	12	22,2	19,5	11,2	0,475	3 800	SYK 30 TR	
35	45	27	42,9	93	47,6	19	126	164	21,5	14,5	12	25,4	25,5	15,3	0,655	5 300	SYK 35 TF	
	45	27	42,9	93	47,6	19	126	164	21,5	14,5	12	25,4	25,5	15,3	0,655	3 200	SYK 35 TR	
40	48	30	49,2	99	49,2	19	136	176	21,5	14,5	12	30,2	30,7	19	0,8	4 800	SYK 40 TF	
	48	30	49,2	99	49,2	19	136	176	21,5	14,5	12	30,2	30,7	19	0,8	2 800	SYK 40 TR	

Figura 5-3: Unidades de rodamientos de bolas Y.

Fuente: (SKF, [sin fecha])

Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

Utilizando el catálogo SKF para la selección de unidades de rodamientos de bolas, se seleccionó:

- Unidades de rodamientos de bolas SKF SYK 20 TF, de una hilera, rodamiento rígido.
- Diámetro interior: **d = 20 mm**
- Altura: H = **64 mm**
- Ancho: A = **32 mm**
- Capacidad de carga básica dinámica: **C = 12,7 kN**

Para el punto C, se seleccionó la misma unidad de rodamiento que en el punto B, ya que la capacidad de carga dinámica requerida es la misma. Quedando como soporte en el punto C la unidad de rodamientos SKF SYK 20 TF, de una hilera de bolas y con un rodamiento rígido, con las mismas características mencionadas anteriormente.

En el punto D se seleccionó el rodamiento 6208-2RS1, como se puede observar en la figura 4-3, cuya capacidad de carga dinámica es de 25 kN, que cumple con los requerimientos necesarios para el buen funcionamiento del módulo de simulación mismo que servirá para realizar los ensayos de prueba para las fallas en la pista interna, externa y externa e interna del rodamiento en los puntos vertical, horizontal y axial. Al igual que en el caso de las unidades de rodamientos seleccionadas anteriormente, este rodamiento no estará sometido a mayores cargas lo que facilitará a la obtención de datos.

Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga	Velocidades nominales		Masa	Designación
d	D	B	dinámica C	estática C ₀	P _u	Velocidad de referencia	Velocidad límite		
mm			kN		kN	r. p. m.		g	-
30 cont.	72	19	22,9	15	0,64	-	6 300	346	▶ W 6306-2RS1
	72	19	22,9	15	0,64	22 000	11 000	345	▶ W 6306-2Z
	72	19	22,9	15	0,64	22 000	14 000	331	▶ W 6306
35	47	7	3,71	3,35	0,14	-	8 500	29,5	▶ W 61807-2RS1
	55	10	9,36	7,65	0,325	-	7 500	73,5	▶ W 61907-2RS1
	62	14	13,8	10,2	0,44	-	6 700	147	▶ W 6007-2RS1
	62	14	13,8	10,2	0,44	24 000	12 000	148	▶ W 6007-2Z
	62	14	13,8	10,2	0,44	24 000	15 000	138	▶ W 6007
	72	17	22,1	15,3	0,655	-	6 000	276	▶ W 6207-2RS1
	72	17	22,1	15,3	0,655	22 000	11 000	277	▶ W 6207-2Z
	72	17	22,1	15,3	0,655	22 000	14 000	262	▶ W 6207
	80	21	28,6	19	0,815	-	5 600	441	▶ W 6307-2RS1
40	62	12	11,9	9,8	0,425	-	6 700	107	▶ W 61908-2RS1
	68	15	14,6	11,4	0,49	-	6 300	182	▶ W 6008-2RS1
	68	15	14,6	11,4	0,49	22 000	11 000	183	▶ W 6008-2Z
	68	15	14,6	11,4	0,49	22 000	14 000	172	▶ W 6008
	80	18	25,1	17,6	0,75	-	5 600	359	▶ W 6208-2RS1
	80	18	25,1	17,6	0,75	20 000	10 000	359	▶ W 6208-2Z

Figura 6-3: Rodamientos rígidos de una hilera de bolas.

Fuente: (SKF, 2019, p. 326)

Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

- Rodamiento 6208-2RS1, de una hilera de bolas, rodamiento rígido
- Diámetro interior: **d = 40 mm**
- Diámetro exterior: **D = 80 mm**
- Ancho: **B = 18 mm**
- Capacidad de carga básica dinámica: **C = 25,1 kN**

3.2.5. Selección de acoplamiento motor-eje

Para seleccionar el tamaño correcto de acoplamiento se debe tener en cuenta el torque máximo producido por el equipo, es así que se calculará el valor de torque máximo de la aplicación T_{Nmax} , que se deduce de multiplicar el valor del torque nominal T_N por el factor de servicio F_s .

Para comprobar que el acople seleccionado es el adecuado un requisito que se debe cumplir es:

$$T_{kN} \geq T_{Nmax} \quad (12)$$

Donde:

T_{kN} : Torque nominal del acoplamiento

T_{Nmax} : Torque máximo de la aplicación

Aplicando las siguientes ecuaciones, se calculará los valores requeridos para la adecuada selección del acople:

$$T_N = \frac{P_N * 9550}{n_N} \quad (13)$$

$$T_{Nmax} = T_N * F_s \quad (14)$$

Donde:

- T_{kN} : Torque nominal del acoplamiento (Nm)
- T_{Nmax} : Torque máximo de aplicación (Nm)
- T_N : Torque nominal de aplicación (Nm)
- P_N : Potencia nominal de la aplicación (kW)
- n_N : Velocidad nominal de la aplicación (rpm)
- F_s : Factor de servicio

Paso 1:

Selección del factor de servicio para la aplicación requerida:

Al utilizar un motor eléctrico para dar movimiento al módulo, y el eje será de accionamiento principal, se utilizó el factor de servicio $F_s = 1,50$, cómo se observa en la figura 5-3:

	Service Factors						Service Factors						Service Factors				
	Electric Motor w/ Standard Torque	Electric Motor w/ High Torque	Steam Turbines & Engines w/ or more Cyl	Reciprocating Engines*			Electric Motor w/ Standard Torque	Electric Motor w/ High Torque	Steam Turbines & Engines w/ or more Cyl	Reciprocating Engines*			Electric Motor w/ Standard Torque	Electric Motor w/ High Torque	Steam Turbines & Engines w/ or more Cyl	Reciprocating Engines*	
				1-Cyl	2-Cyl					1-Cyl	2-Cyl					1-Cyl	2-Cyl
Agitators	1.00	1.25	1.00	1.7	1.3	Feeders						Beater, Pulper,					
Band Resaw (lumber).....	1.50	1.75	1.50	2.2	1.8	Belt, Screw.....	1.00	1.25	1.00	1.7	1.3	Jordans, Dresses.....	2.00	2.25	2.00	2.7	2.3
Barge Haul Puller	2.00	2.25	2.00	2.7	2.3	Reciprocating.....	2.50	2.75	2.50	3.2	2.8	Calenders, Dryers, Washers,					
Beaters	1.50	1.75	1.50	2.2	1.8	Filter, Press-oil	1.50	1.75	1.50	2.2	1.8	Thickener.....	1.50	1.75	1.50	2.2	1.8
Blowers						Generators						Converting Machines,					
Centrifugal.....	1.00	1.25	1.00	1.7	1.3	Not Welding.....	1.00	1.25	1.00	1.7	1.3	Conveyors.....	1.20	1.45	1.20	1.9	1.5
Lobe, Vane.....	1.25	1.50	1.25	2.0	1.6	Welding.....	2.00	2.25	2.00	2.7	2.3	Printing Presses	1.50	1.75	1.50	1.7	1.3
Bottling Machinery	1.25	1.50	1.25	2.0	1.6	Hoist.....	1.50	1.75	1.50	2.2	1.8	Pug Mill	1.75	2.00	1.75	2.0	1.6
Brew Kettles (distilling).....	1.25	1.50	1.25	2.0	1.6	Hammermills	2.00	2.25	2.00	2.7	2.3	Pumps					
Can Filling Machinery	1.00	1.25	1.00	1.7	1.3	Kilns.....	1.50	1.75	1.50	2.2	1.8	Centrifugal.....	1.00	1.25	1.00	1.7	1.3
Car Dumpers	2.50	2.75	2.50	3.2	2.8	Laundry Washers —						Gear, Rotary, Vane.....	1.25	1.50	1.25	2.0	1.6
Car Pullers	1.50	1.75	1.50	2.2	1.8	Reversing.....	2.00	2.25	2.00	2.7	2.3	Reciprocating:					
Card Machine	1.75	2.00	1.75	2.5	2.0	Lumber Machinery						1-Cyl, Single or					
Chiller (oil).....	1.50	2.00	1.25	2.0	2.0	Barkers, Edger Feeder,						Double Acting.....	2.00	2.25	2.00	2.7	2.3
Compressors						Live Roll.....	2.00	2.25	2.00	2.7	2.3	2-Cyl, Single Acting.....	2.00	2.25	2.00	2.7	2.3
Centrifugal.....	1.00	1.25	1.00	1.7	1.3	Planer, Slab Conveyor.....	2.00	2.25	2.00	2.7	2.3	2-Cyl, Double Acting.....	1.75	2.00	1.75	2.5	2.0
Screw, Lobe.....	1.25	1.50	1.25	2.0	1.6	Machine Tools						3 or more Cyl.....	1.50	1.75	1.50	2.2	1.8
Reciprocating.....	See Note					Punch Press-gear Driven,						Rubber Machinery					
Conveyors, Uniformly Fed						Plate Planer.....	2.00	2.25	2.00	2.7	2.3	Mixers.....	2.50	2.75	2.50	3.2	2.8
Assembly, Belt, Screw.....	1.00	1.25	1.00	1.7	1.3	Tapping Machinery,						Rubber Calender.....	2.00	2.25	2.00	2.7	2.3
Bucket, Sawdust.....	1.25	1.50	1.25	2.0	1.6	Bending Roll.....	2.00	2.25	2.00	2.7	2.3	Screens					
Live Roll, Shaker,						Main Drive.....	1.50	1.75	1.50	2.2	1.8	Air washing, Water.....	1.00	1.25	1.00	1.7	1.3
Reciprocating.....	3.00	3.25	3.00	3.7	3.3	Auxiliary Drives.....	1.00	1.25	1.00	1.7	1.3	Rotary—stone or gravel,					

Figura 7-3: Factor de servicio para la selección del acople.

Fuente: (Lovejoy, 2018, p. 20)

Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

Paso 2:

Ahora se procede a calcular el torque máximo de la aplicación (T_{Nmax}):

$$T_N = \frac{P_N * 9550}{n_N} \quad (13)$$

$$T_N = \frac{0,5 \text{ hp} * 9550}{1700 \text{ rpm}}$$

$$T_N = 2,8 \text{ Nm}$$

$$T_{Nmax} = T_N * F_s \quad (14)$$

$$T_{Nmax} = 2,8 \text{ Nm} * 1,5$$

$$T_{Nmax} = 4,2 \text{ Nm}$$

Paso 3:

Size	Elastomeric Member	Number of Jaws	Basic HP Ratings @ Varying RPM				Torque Rating		Max Bore		Max x1000 RPM
			100	1200	1800	3600	in-lbs	Nm	in	mm	
L, AL & LC Type											
L035	SOX (NBR)	2	0.006	0.07	0.10	0.22	3.5	0.40	0.375	9	31.0
L050/AL050	SOX (NBR)	2	0.042	0.50	0.75	1.51	26.3	2.97	0.625	16	18.0
L050/AL050	Hytrel®	2	0.080	0.96	1.43	2.88	50.0	5.65	0.625	16	18.0
L070/AL070	SOX (NBR)	2	0.070	0.84	1.23	2.52	43.2	4.88	0.750	19	14.0
L070/AL070	Hytrel	2	0.180	2.16	3.26	6.48	114.0	12.88	0.750	19	3.6
L075/AL075	SOX (NBR)	3	0.140	1.68	2.57	5.04	90.0	10.17	0.875	22	11.0
L075/AL075	Hytrel	3	0.360	4.32	6.48	12.96	227.0	25.65	0.875	22	3.6
L090/AL090/LC090	SOX (NBR)	3	0.230	2.76	4.11	8.28	144.0	16.27	1.000	25	9.0

Figura 8-3: Acoples tipo L, AL & LC.

Fuente: (Lovejoy, 2018, p. 34)

Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

Mediante catálogo se seleccionó el acople Lovejoy L075, que tiene un torque nominal (T_{kN}) de 25,65 Nm, como se puede observar en la figura 6-3.

$$T_{kN} \geq T_{Nmax} \quad (12)$$

$$25,65 \text{ Nm} \geq 4,2 \text{ Nm}$$

Al realizar la comparación, se comprobó que el acople que se seleccionó es el correcto, y cumplirá con su función sin ningún inconveniente.

3.3. Delineamiento del módulo de simulación en SolidWorks Académico

Después de haber seleccionado los elementos que componen el módulo de simulación de fallas en rodamientos, se procedió al delineamiento en SolidWorks Académico, considerando la facilidad en la manipulación del mismo, y permitiendo el montaje y desmontaje de rodamientos con defectos y buen estado, para poder realizar la simulación de fallas en rodamientos.

3.3.1. Delineamiento de la base del módulo de simulación

La base del módulo de simulación consta de: la placa base (1), base del motor eléctrico (2), platina de la base del motor eléctrico (3), bases de las chumaceras (4), tal y como se muestra en la figura 7-3.

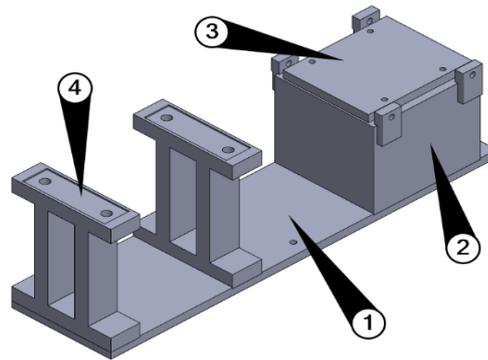


Figura 9-3: Base del módulo de simulación de fallas en rodamientos.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

Las dimensiones de los elementos de la base del módulo de simulación de fallos en rodamientos se detallan en la tabla 6-3:

Tabla 6-3: Dimensiones de los elementos de la base del módulo

Cantidad	Elemento	Ancho (mm)	Largo (mm)	Espesor (mm)	Material
1	Placa base	150	600	12,7	AISI 1020
1	Base del motor eléctrico	150	120,5	6	AISI 1020
1	Platina de la base del motor eléctrico	150	160	6	AISI 1020
2	Base de la chumacera	150	176	38	AISI 1020

Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

El ajuste de los elementos sobre la base del módulo de simulación de fallos en rodamientos se lo realizará mediante pernos en agujeros roscados.

3.3.2. Modelación del mecanismo de sujeción del rodamiento de pruebas

Es el lugar donde irá ubicado el rodamiento con defecto, que será objeto de análisis vibracional para obtener los espectros necesarios para el diagnóstico de fallas. Se delineó este elemento para facilitar el montaje y desmontaje de rodamientos, puesto que, el diagnóstico de fallas requiere un número considerable de medición de espectros.

El mecanismo de sujeción del rodamiento de pruebas consta de ciertos elementos, indispensables para la toma exacta de mediciones de vibraciones, como el porta rodamientos (1), y el bocín para el rodamiento - eje (2), que sirve para ajustar el eje con el rodamiento; los cuales se representan en la figura 8-3, que se muestra a continuación:

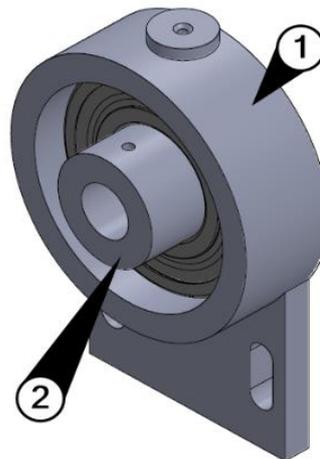


Figura 10-3: Mecanismo de sujeción.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

Los elementos que forman parte del mecanismo de sujeción del rodamiento, establecen las siguientes dimensiones, como se observa en la tabla 7-3:

Tabla 7-3: Dimensiones de los elementos del mecanismo de sujeción

Cantidad	Elemento	Diámetro interior (mm)	Diámetro exterior (mm)	Ancho (mm)	Material
1	Porta rodamientos	80	92	26	AISI 1020
1	Bocín	20	40	42	AISI 1020

Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

Adicionalmente, se delineó un agujero en el bocín rodamiento - eje, con el fin de insertar un perno hexagonal hueco y elaborar un prisionero, asegurando el movimiento rotacional de la pista interna del rodamiento con el eje, como se observa en la figura 9-3.

Los rodamientos con falla en la pista interna, externa e interna y externa serán reemplazados de manera continua, para obtener los datos necesarios para el análisis comparativo, siguiendo el siguiente procedimiento:

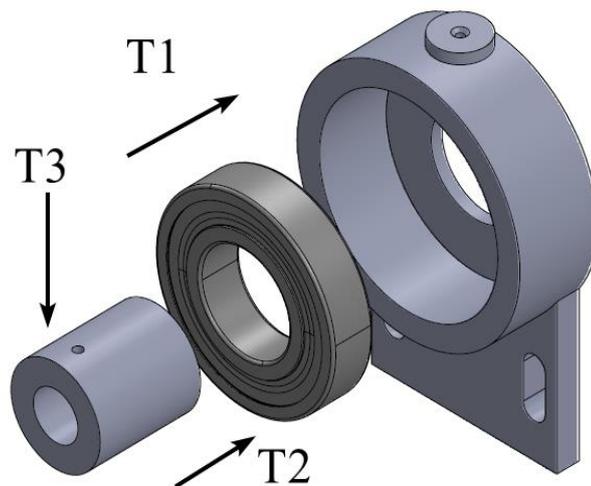


Figura 11-3: Montaje del mecanismo de sujeción.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

- Insertar el rodamiento T1 en el porta rodamientos hasta centrarlo en su interior de manera que se pueda montar y desmontar a la hora de la ejecución de las pruebas.
- Insertar el bocín rodamiento-eje T2 hasta coincidir el extremo de este con la cara posterior del rodamiento.
- Insertar el perno hexagonal hueco T3 en el agujero del bocín rodamiento-eje T2 hasta ajustarlo con el eje.

3.3.3. *Montaje de los elementos del módulo de simulación*

Una vez colocadas las bases de las chumaceras y del motor, se procede a montar el motor junto con las chumaceras y ajustarlos mediante pernos. Una vez montado el motor, se coloca el acople en el eje del motor, como se observa en la figura 10-3.

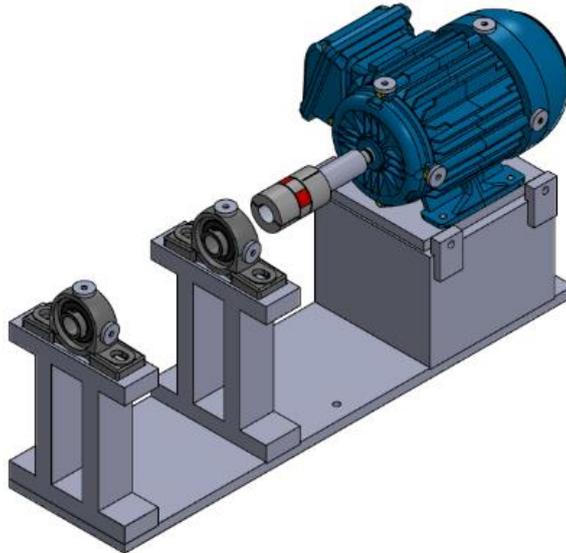


Figura 12-3: Montaje del motor y chumaceras.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

A continuación, se coloca el eje de transmisión sobre los soportes, en este caso chumaceras, hasta ajustarlo mediante tornillos en el acople, como se muestra en la figura 11-3, asegurando la transmisión de movimiento rotacional del motor con el eje.

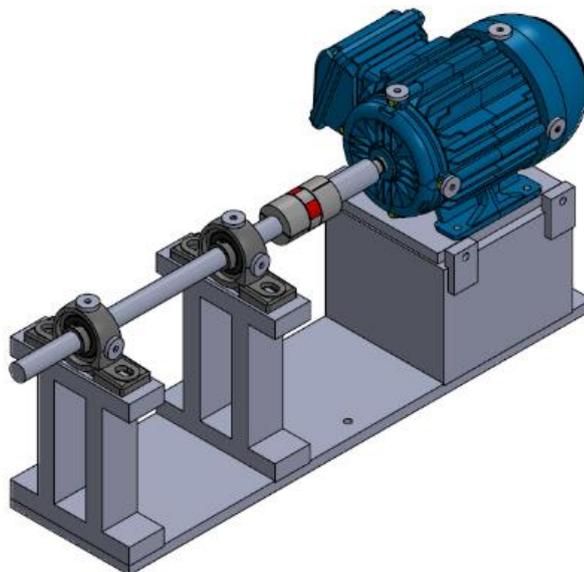


Figura 13-3: Montaje del eje en el módulo de simulación.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

Por último, se coloca el mecanismo de sujeción de rodamientos de pruebas sobre el eje, como se observa en la figura 12-3, hasta asegurar el bocín rodamiento - eje con el perno hexagonal hueco.

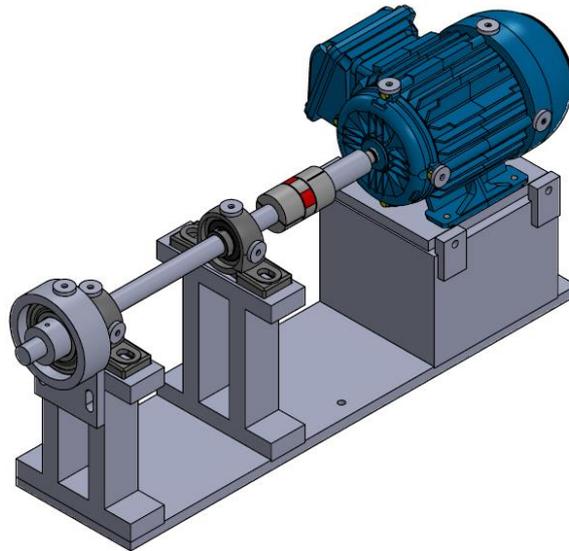


Figura 14-3: Montaje del mecanismo de sujeción en el módulo.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

La figura 13-3, muestra los elementos que componen el módulo de simulación de fallas en rodamientos:

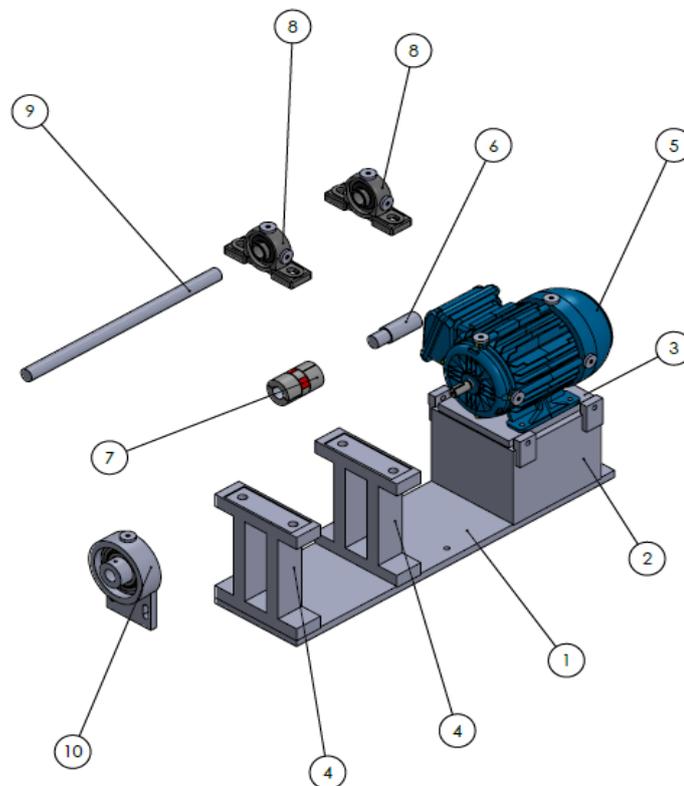


Figura 15-3: Vista explosionada del módulo de simulación.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

El módulo de simulación de fallas en rodamientos se construirá con los materiales descritos en la tabla 8-3, que se muestra a continuación:

Tabla 8-3: Lista de materiales del módulo de simulación

10	Porta rodamientos	1	AISI 1020 100x142,8x35
9	Eje principal	1	AISI 1144 $\phi 20 \times 380$
8	Chumacera P 204	2	Hierro fundido 126x64,5x32
7	Acople Lovejoy L075	1	Hierro $\phi 12,7 \times 25,4$
6	Eje secundario	1	AISI 1144 $\phi 20 \times 100$
5	Motor WEG W22	1	Hierro fundido 245x145x132
4	Base de chumacera	2	AISI 1020 181,70x153x45
3	Placa del motor	1	AISI 1020 132x160x12
2	Base del motor	1	AISI 1020 153x165x130
1	Base del módulo	1	AISI 1020 153x596x12
Marca	Descripción	Cantidad	Material y dimensiones

Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

En la figura 14-3, que se observa a continuación, se muestra los componentes ensamblados ya en el módulo de simulación:

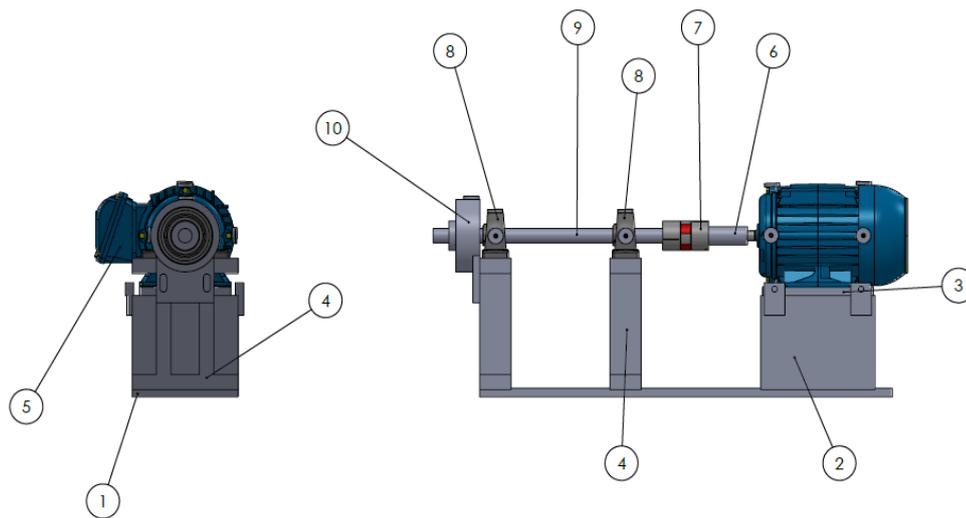


Figura 16-3: Componentes en conjunto del módulo de simulación.

Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

El delineamiento del módulo de simulación de fallas en rodamientos en el software SolidWorks Académico es de suma importancia, ya que, comprobamos que la disposición de los elementos permitirá realizar la medición de vibraciones en rodamientos con defectos, sin afectar a otros elementos del módulo, inclusive a otros elementos del laboratorio de diagnóstico técnico y eficiencia energética. Además, nos permite analizar las características y los principios físicos que presentará el módulo al momento de la puesta en marcha del mismo.

3.4. Construcción del módulo de simulación de fallas en rodamientos

3.4.1. Construcción de la mesa del módulo de simulación

En primer lugar, se fabricó la mesa para el módulo de simulación de fallas en rodamientos, con el fin de dimensionar el espacio que este ocupará dentro del laboratorio de diagnóstico técnico y eficiencia energética; para posicionarlo de tal manera que vibraciones ajenas al módulo de simulación no afecten a la toma de vibraciones en los rodamientos de pruebas.

A continuación, en la figura 15-3 se muestra la mesa donde se ubicará el módulo de simulación de fallas en rodamientos:



Figura 17-3: Mesa ensamblada del módulo de simulación.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

3.4.2. Mecanizado de las piezas del módulo de simulación

Para empezar, se cortó las piezas de la estructura del módulo de simulación, como se puede observar en las figuras 16-3 y 17-3, para posteriormente mecanizarlas hasta que alcancen las medidas que se propuso en el capítulo 3.3 de delineamiento del módulo de simulación en SolidWorks Académico.



Figura 18-3: Corte de las piezas del módulo de simulación.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022



Figura 19-3: Piezas mecanizadas.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

3.4.3. *Ensamblaje de las piezas mecanizadas*

Posterior al mecanizado de las piezas se procedió al ensamblaje de las mismas, como se observa en la figura 18-3, utilizando pernos hexagonales para permitir un desmontaje posterior del módulo de simulación; para esto se tomó como referencia el delineamiento hecho en SolidWorks Académico. El conjunto total unido se muestra en la figura 19-3:

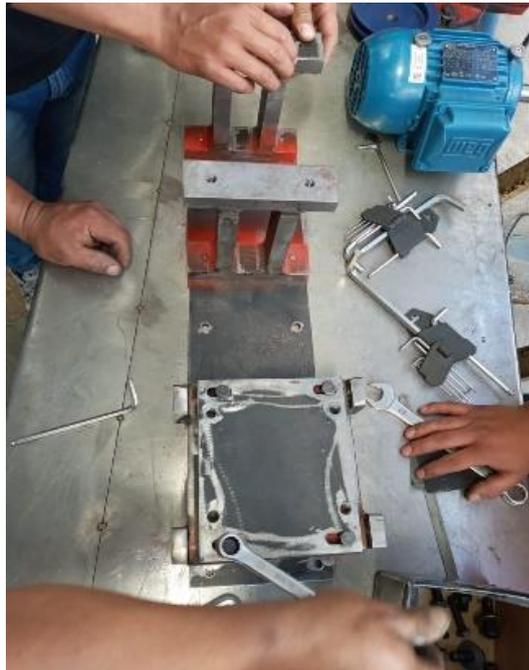


Figura 20-3: Ensamblaje de las bases del módulo.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022



Figura 21-3: Módulo de simulación ensamblado.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

3.4.4. Acople del módulo de simulación a la mesa

Por último, teniendo las piezas del módulo de simulación ensambladas, se acopló todo el conjunto a la mesa, como se observa en las figuras 20-3 y 21-3, para tener un mayor aislamiento a vibraciones externas que afecten a las mediciones que se realizarán.



Figura 22-3: Perforación de los huecos para la sujeción.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022



Figura 23-3: Módulo de simulación acoplado a la mesa.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

3.5. Pruebas en el módulo de simulación de fallas en rodamientos

3.5.1. Procedimiento de las pruebas

1. Identificar los puntos de medición

Los puntos en donde se realizarán las mediciones de vibraciones se indican en la tabla 9-3, que se muestra a continuación:

Tabla 9-3: Puntos de medición

Tipo de falla	Punto de medición
Condición normal	P1, P2, P3
Fallas en la pista interna	P1, P2, P3
Falla en la pista externa	P1, P2, P3
Falla en las pistas interna y externa	P1, P2, P3

Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

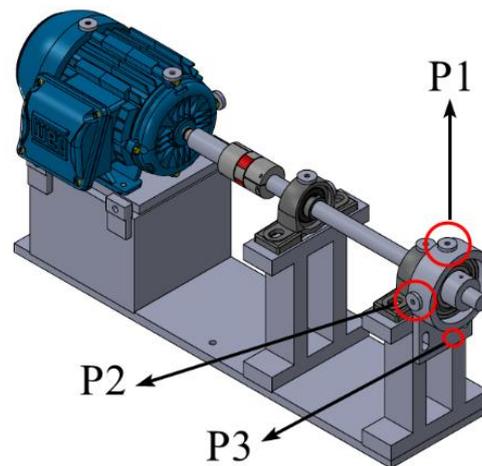


Figura 24-3: Puntos de medición del módulo de simulación.

Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

2. Realizar el estudio de las señales en el dominio de la frecuencia en el software MAINTraQ Predictive.
3. Las pruebas a desarrollar se representan en los parámetros de envolvente y velocidad, ya que así se puede visualizar de manera adecuada la falla.
4. Frecuencia de operación: **60 Hz**.

5. Las pruebas a realizar son las siguientes:

- **Prueba 1:** Rodamiento en condición normal.
- **Prueba 2:** Rodamiento con falla en la pista interna.
- **Prueba 3:** Rodamiento con falla en la pista externa.
- **Prueba 4:** Rodamiento con fallas en las pistas interna y externa.

6. Tiempo por prueba: **45 segundos**.

3.5.2. *Realización de fallas*

Para realizar las simulaciones en el módulo, se provocó defectos en los rodamientos, un rodamiento con defectos en la pista interna, otro con defectos en la pista externa y un último con defectos en la pista interna y externa. A continuación, se detalla la inducción de las fallas realizadas:

3.5.2.1. *Rodamiento con defectos en la pista externa*

Para provocar el defecto en la pista externa del rodamiento se utilizó una punta de acero, causando ralladuras de diferente longitud a lo largo de la superficie, como se puede observar en la figura 23-3. Además, las puntas de acero fueron de diferente diámetro, para variar las dimensiones de las ralladuras.



Figura 25-3: Inducción de ralladuras en la pista externa del rodamiento.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022



Figura 26-3: Ralladuras en la pista externa del rodamiento.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

3.5.2.2. Rodamiento con defectos en la pista interna

Para provocar este defecto se retiró una de las protecciones de caucho que posee el rodamiento, y se procedió a realizar ralladuras utilizando una punta de acero con un martillo de goma, como se puede observar en la figura 25-3. De la misma manera, se retiró un poco de grasa del rodamiento en su interior para facilitar la realización de los defectos.



Figura 27-3: Inducción de ralladuras en la pista interna del rodamiento.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022



Figura 28-3: Ralladuras en la pista interna del rodamiento.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

3.5.2.3. Rodamiento con defectos en las pistas interna y externa

Se realizó el procedimiento utilizado con anterioridad para desarmar el rodamiento y se utilizó una punta de acero para provocar los defectos en las pistas interna y externa, como se muestra en la figura 27-3. Además, se retiró grasa del interior del rodamiento para que las fallas provocadas se noten más al momento de realizar el análisis de vibraciones.



Figura 29-3: Elaboración de defectos en la pista interna.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022



Figura 30-3: Elaboración de defectos en la pista externa.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

3.5.2.4. *Rodamiento en condición normal*

También se utilizará un rodamiento en condición normal, para simular su funcionamiento. Para este rodamiento no interferimos en sus propiedades, ni en sus características funcionales, como se puede observar en la figura 29-3.



Figura 31-3: Rodamiento en condición normal.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

3.5.3. Medición de la frecuencia natural del módulo de simulación

La frecuencia natural es indispensable para el diagnóstico vibracional de fallos en rodamientos, ya que, nos indica la frecuencia del espectro y es un parámetro elemental que no dependerá de un factor externo, en el cual diagnosticaremos el estado del motor, en tres puntos:

- Vertical
- Horizontal
- Axial

La frecuencia fundamental del motor eléctrico es 30 Hz, posterior a ello, se medirá la frecuencia natural para los puntos mencionados anteriormente. Para lo cual se utilizará el software MAINTraQ Viewer, primero se debe configurar ciertos parámetros. Estos parámetros son: La ubicación y el tipo de sensor, para este tipo de ensayo la ubicación es radial y el sensor es un acelerómetro; se configurará también el tipo de apoyo, en el presente trabajo de integración curricular se considera un rodamiento 6208-2RS1; además, se cambiará el tipo de variable para un valor rms y la forma de onda que es la velocidad. Una vez configurado el software, y calibrado el sensor Vibracheck procedemos a medir la frecuencia natural del módulo de simulación.

En primer lugar, con el acelerómetro colocado en el punto vertical se golpea con un martillo de goma la armadura del motor, posterior a esto el aparato de medición recolectará la información y se descargará al PC en donde observaremos el espectro de la medición vertical con la frecuencia natural que es 24,4 Hz, como se puede observar en la figura 30-3.

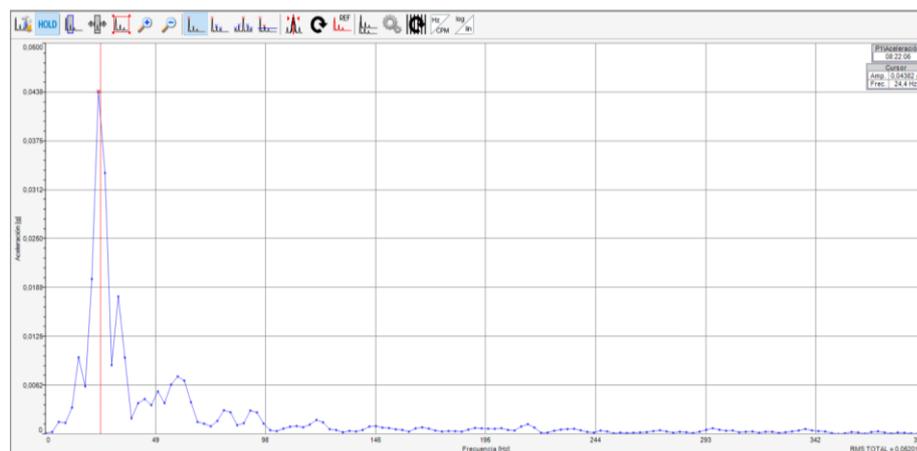


Figura 32-3: Espectro de la frecuencia natural en el plano vertical.

Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

Después, con el acelerómetro colocado en el punto horizontal, se golpea la armadura del motor eléctrico del módulo de simulación con el martillo de goma, el Vibracheck recolectará los datos y los procesará, para después descargar esta información en la PC y obtener el espectro de la medición horizontal con su frecuencia natural que es 26 Hz, como se puede observar en la figura 31-3.

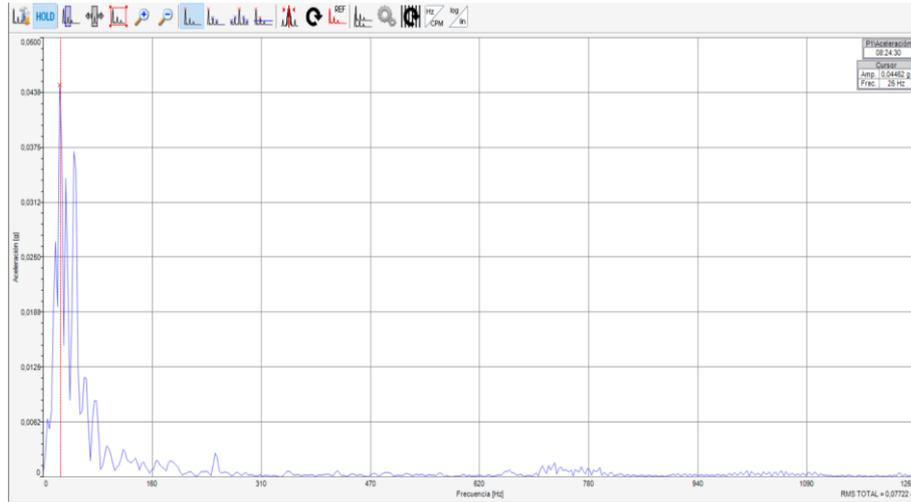


Figura 33-3: Espectro de la frecuencia natural en el plano horizontal.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

Para la medición en el punto axial se realizó el procedimiento descrito anteriormente y se obtuvo una frecuencia natural de 18,1 Hz, como se puede observar en la siguiente figura 32-3:

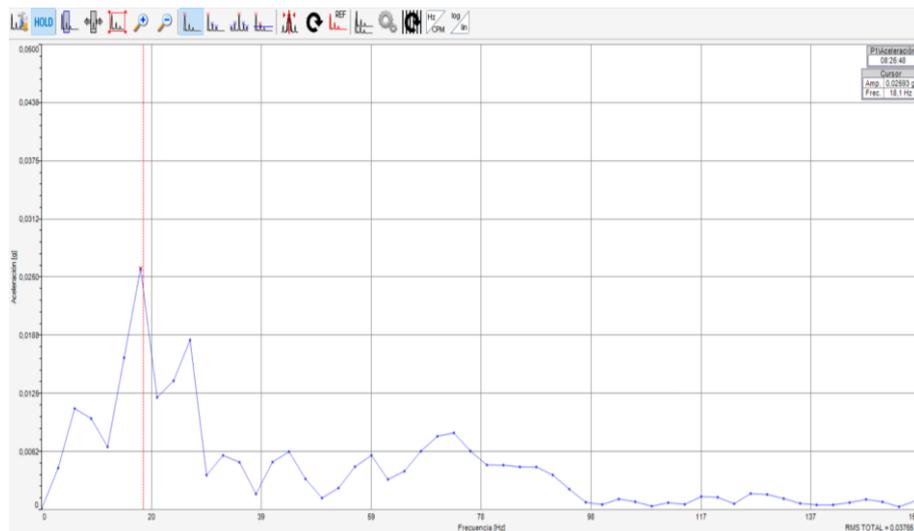


Figura 34-3: Espectro de la frecuencia natural en el plano axial.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

De las figuras 30-3, 31-3, y 32-3, se elabora la tabla 10-3, que se muestra a continuación con los datos de la frecuencia natural obtenidos en cada plano de medición:

Tabla 10-3: Valores de frecuencia natural para cada plano de medición

Plano	Frecuencia (Hz)
Vertical	24,4
Horizontal	26
Axial	18,1

Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

Para determinar la flexibilidad del soporte tomamos en cuenta ciertos factores como la frecuencia fundamental, las frecuencias naturales (f_n) obtenidas y las siguientes fórmulas.

$$f_1 = \frac{4}{5} * f_n \quad (15)$$

$$f_1 = \frac{4}{5} * 24,4 \text{ Hz}$$

$$f_1 = 19,52 \text{ Hz}$$

$$f_2 = \frac{6}{5} * f_n \quad (16)$$

$$f_2 = \frac{6}{5} * 26 \text{ Hz}$$

$$f_2 = 31,2 \text{ Hz}$$

Hay que tener presente que la frecuencia fundamental de un motor de 4 polos es 30 Hz.

Como la primera frecuencia natural medida en el plano vertical (f_1) es menor que la frecuencia fundamental (30 Hz) en al menos un 25%, entonces el tipo de soporte puede ser considerado rígido en esta dirección. De la misma manera, la segunda frecuencia natural medida en el plano horizontal (f_2) es mayor que la frecuencia fundamental (30 Hz), por lo tanto, el tipo de soporte en este plano es flexible.

3.5.4. Medición de frecuencias características

La recolección y procesamiento de datos se realizó mediante el software MAINtraq Predictive, el cual permite recolectar los datos que provienen de un sensor acelerómetro. Se obtuvieron los espectros de velocidad y envolvente. El espectro de velocidad se utilizó para corregir los ciclos por minuto en cada plano de medición. Posteriormente, utilizando el espectro de envolvente se identificó las frecuencias características para cada ensayo realizado.

3.5.4.1. Medición de frecuencias para el rodamiento en condición normal

Se realizó la medición de vibraciones en los puntos mencionados en la tabla 9-3, utilizando el rodamiento en condición normal a una frecuencia de 60 Hz, obteniendo los siguientes espectros:

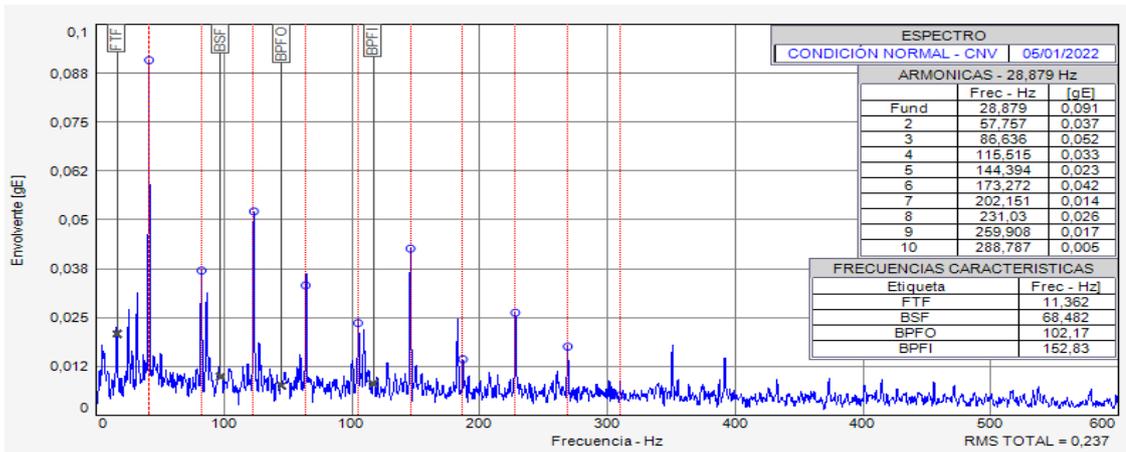


Figura 35-3: Espectro de envolvente, plano vertical, condición normal.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

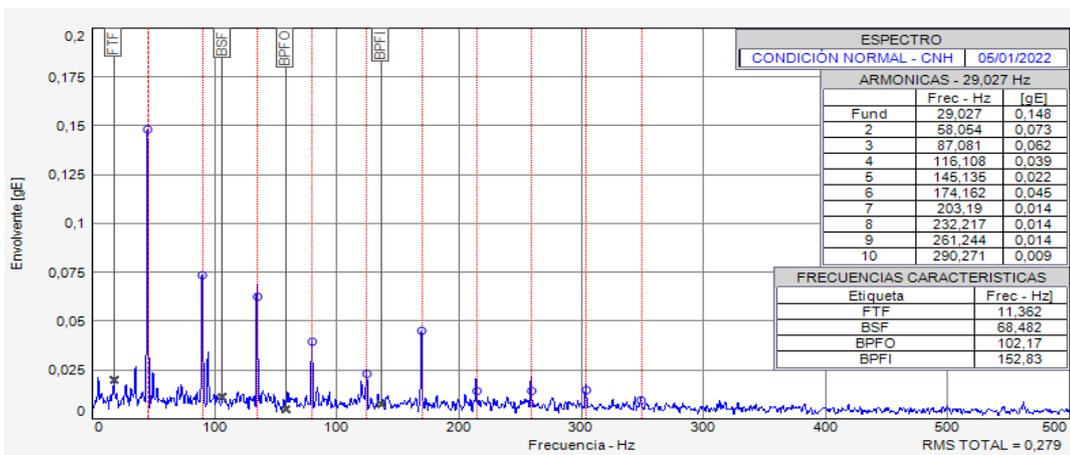


Figura 36-3: Espectro de envolvente, plano horizontal, condición normal.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

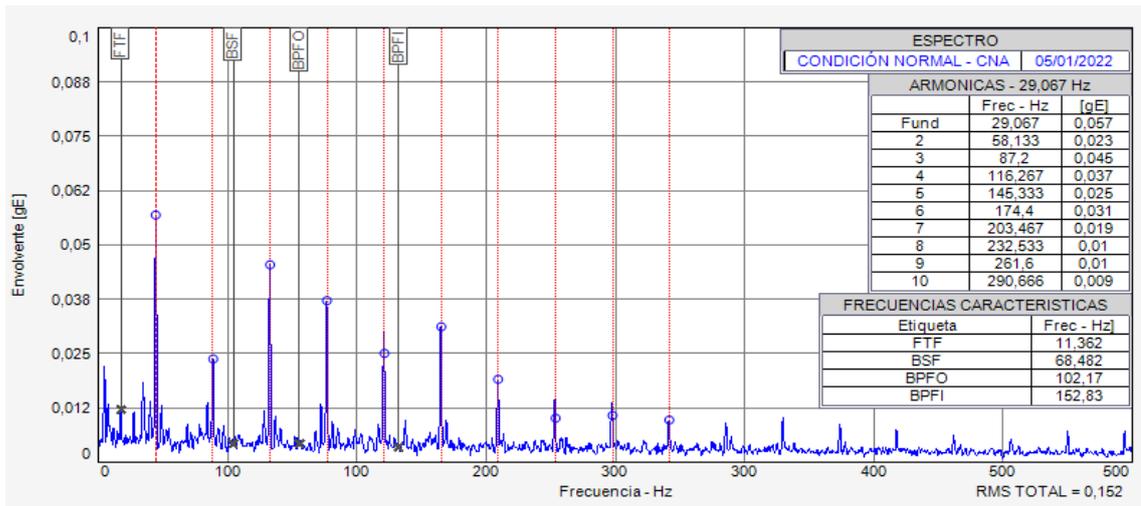


Figura 37-3: Espectro de envolvente, plano axial, condición normal.
 Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

En las figuras 33-3, 34-3 y 35-3 se observa cómo ningún pico del espectro coincide con ninguna frecuencia característica, por lo tanto, el rodamiento con el que se realizó el ensayo no presenta ninguna falla y los valores de las frecuencias características tienen un valor de cero.

3.5.4.2. Medición de frecuencias para el rodamiento con falla en la pista interna

Para este ensayo las mediciones fueron en tres planos (vertical, horizontal y axial), utilizando un rodamiento con picaduras en la pista interna. Al realizar el análisis vibracional se obtuvo los siguientes espectros:

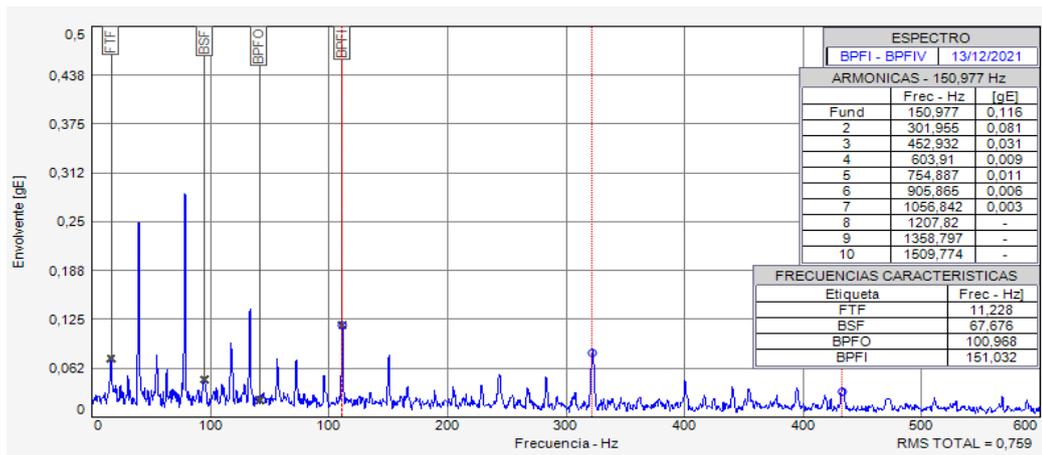


Figura 38-3: Espectro de envolvente, plano vertical, falla pista interna.
 Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

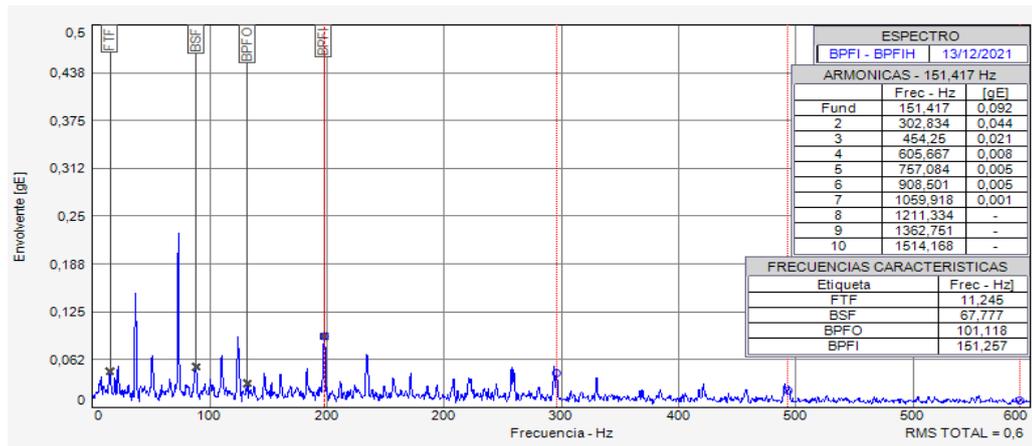


Figura 39-3: Espectro de envoltura, plano horizontal, falla pista interna.
 Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

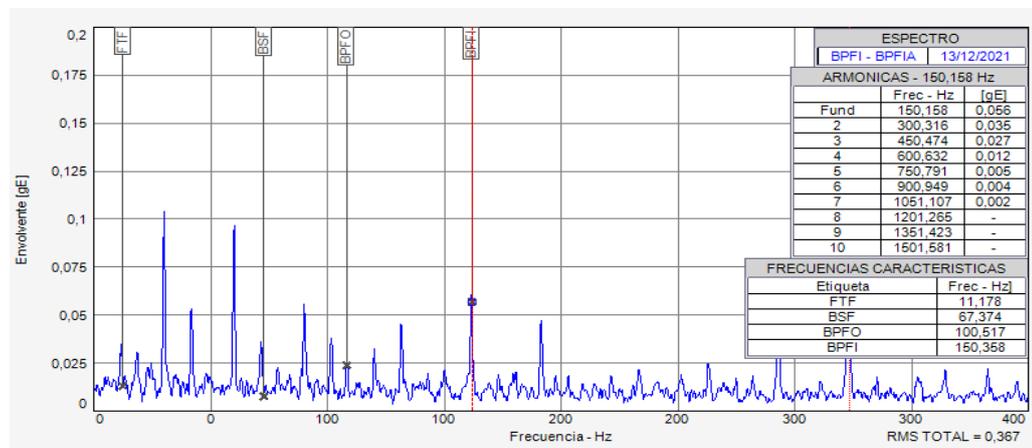


Figura 40-3: Espectro de envoltura, plano axial, falla pista interna.
 Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

En este caso los armónicos de los espectros coinciden con la frecuencia de la pista interna, debido a que en este ensayo se utilizó un rodamiento con picaduras en la pista interna, con lo que el resultado del ensayo es correcto, como se muestra en las figuras 36-3, 37-3 y 38-3.

3.5.4.3. Medición de frecuencias para el rodamiento con falla en la pista externa

En este ensayo se utilizó un rodamiento en el cual se realizó diferentes defectos en la pista externa, con la ayuda de una broca y otras herramientas punzantes de acero, con anterioridad. Se realizó la medición de vibraciones en los tres planos como se indicó en los casos previos (horizontal, vertical y axial), y se obtuvo los siguientes espectros:

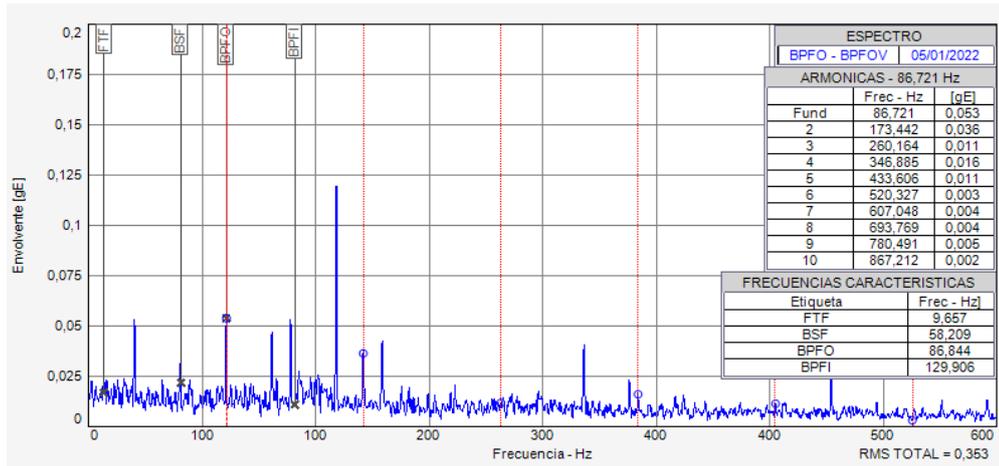


Figura 41-3: Espectro de envoltura, plano vertical, falla pista externa.
 Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

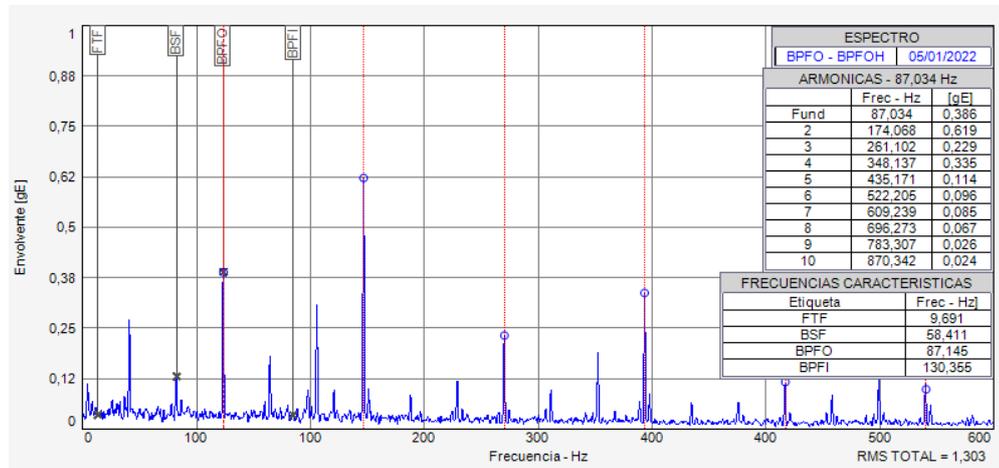


Figura 42-3: Espectro de envoltura, plano horizontal, falla pista externa.
 Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

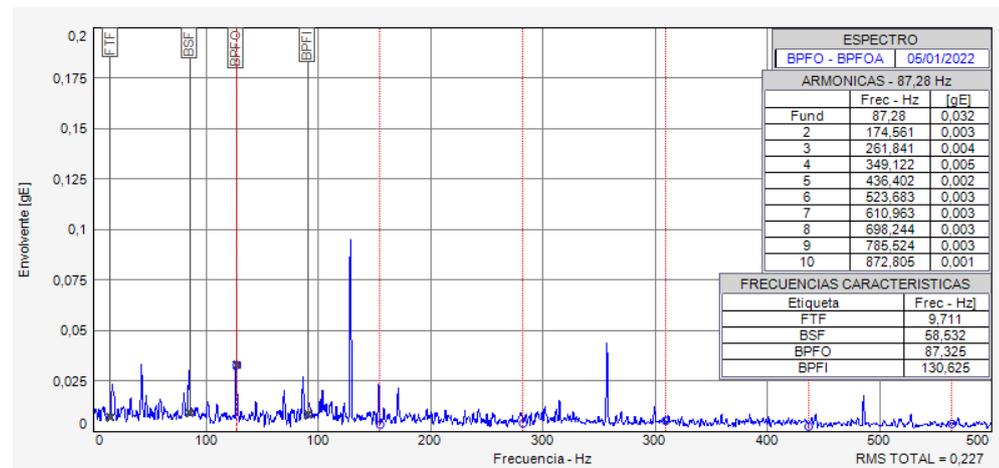


Figura 43-3: Espectro de envoltura, plano axial, falla pista externa.
 Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

En las figuras 39-3, 40-3 y 41-3 se observa como la frecuencia de la pista externa (BPFO) coincide con un armónico en cada espectro obtenido, es decir que el BPFO para cada caso tiene un valor de frecuencia y amplitud.

3.5.4.4. Medición de frecuencias para el rodamiento con dos tipos de fallas

De la misma manera que en las mediciones 3.5.4.1 a 3.5.4.3 se realizó la toma de datos en los planos vertical, horizontal y axial. Se realizó picaduras en las pistas externa e interna del rodamiento para realizar el ensayo, obteniéndose los siguientes espectros.

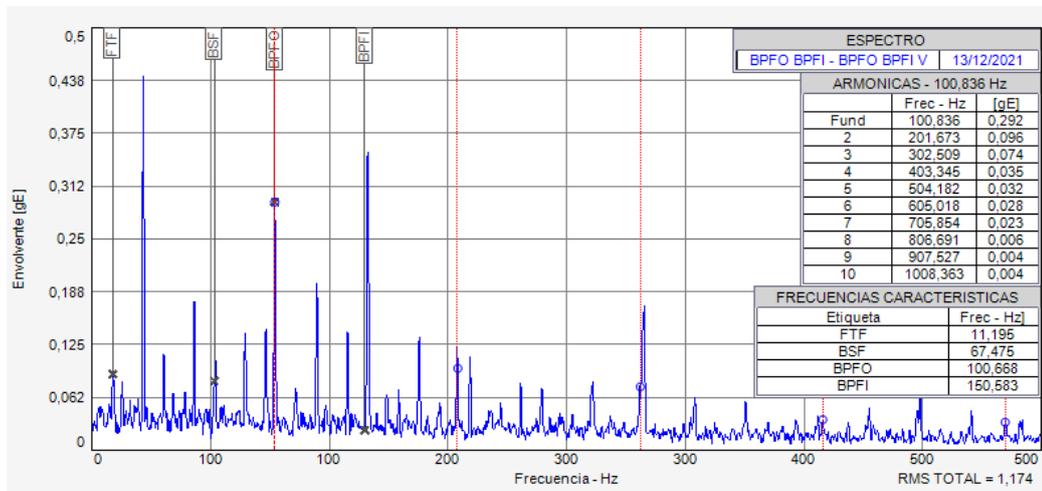


Figura 44-3: Espectro de envolvente, plano vertical, falla pista externa e interna.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

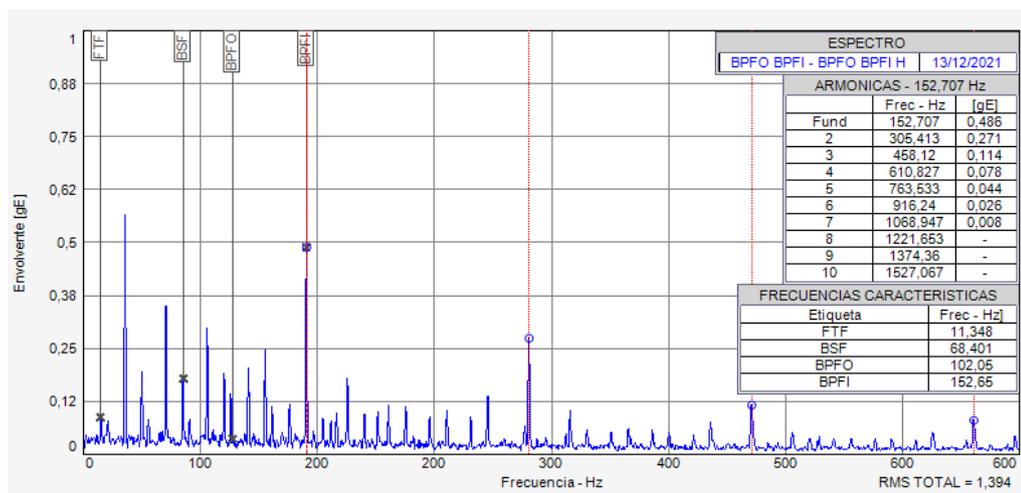


Figura 45-3: Espectro de envolvente, plano horizontal, falla pista externa e interna.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

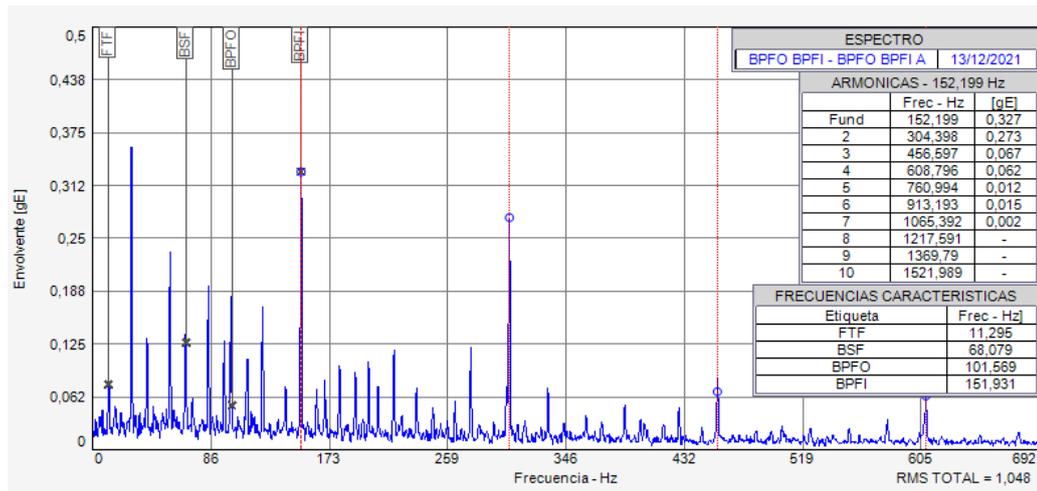


Figura 46-3: Espectro de envoltura, plano axial, falla pista externa e interna.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

Las figuras 42-4, 43-4 y 44-4 muestran como las frecuencias de la pista externa (BPFO) e interna (BPFI) coinciden con armónicos para cada espectro obtenido de las mediciones, lo que coincide con los defectos que posee el rodamiento analizado.

3.5.4.5. Tabulación de los valores de las frecuencias características

Con la ayuda de una herramienta que proporciona el software MAINTraQ Predictive llamada “mostrar cursor principal”, podemos obtener los diferentes valores de frecuencias.

Las frecuencias características de fallos de los rodamientos utilizados en los ensayos tienen un valor en hercios, y se obtendrán de los espectros 33-3 a 44-4. A continuación se estructuran tablas como tabla 11-3, 12-3 y 13-3 con los siguientes valores:

Tabla 11-3: Frecuencias de fallo, plano vertical

Rodamiento \ Frecuencia	BPFO (Hz)	BPFI (Hz)	BFB (Hz)	FTF (Hz)
Condición normal				
Falla en la pista externa	86,844			
Falla en la pista interna		151,032		
Falla pista externa e interna	100,668	150,583		

Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

Tabla 12-3: Frecuencias de fallo, plano horizontal

Rodamiento \ Frecuencia	BPFO (Hz)	BPFI (Hz)	BFB (Hz)	FTF (Hz)
Condición normal				
Falla en la pista externa	87,145			
Falla en la pista interna		151,257		
Falla pista externa e interna	102,05	152,65		

Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

Tabla 13-3: Frecuencias de fallo, plano axial

Rodamiento \ Frecuencia	BPFO (Hz)	BPFI (Hz)	BFB (Hz)	FTF (Hz)
Condición normal				
Falla en la pista externa	87,325			
Falla en la pista interna		150,358		
Falla pista externa e interna	101,569	151,939		

Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

En el anexo f se encuentran las mediciones de amplitudes.

Las uniones roscadas del módulo de simulación tienden a aflojarse debido a cargas dinámicas de todo tipo, como vibraciones e inclusive a cambios de temperatura debido al rose de elementos. Para obtener resultados óptimos se aplicó un apriete óptimo a los pernos del módulo de simulación tal como lo indica la norma DIN 267 parte 27, por ejemplo: para los pernos M6 se aplicó un momento de atornillado de 0,8 Nm, para pernos M8 el momento de atornillado aplicado fue de 1,5 Nm, mientras que para pernos M10 el momento de atornillado fue de 3 Nm respectivamente.

Para evitar minúsculos movimientos, que ocasionen el aflojamiento de la unión roscada, se puede utilizar métodos de fijación de pernos como recubrimientos adhesivos. Haciendo uso de estos recubrimientos se puede obtener inclusive datos mas precisos.

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El actual trabajo de integración curricular tiene como objetivo la construcción de un módulo de simulación para el diagnóstico vibracional de fallos en rodamientos, que será aprovechado por los estudiantes de la asignatura de diagnóstico técnico, para la medición de vibraciones en el plano vertical, horizontal, y axial, para su posterior interpretación y comparación de espectros de rodamientos en buen estado y en mal estado mediante un análisis vibracional, en el laboratorio de diagnóstico técnico y eficiencia energética de la Facultad de Mecánica de la ESPOCH.

4.1. Constatación del diseño del módulo de simulación

Se diseñó el módulo de simulación de fallas en rodamientos mediante el uso del software SolidWorks Académico, como se evidencia en el capítulo 3.3, tal y como se representa en la figura 1-4.

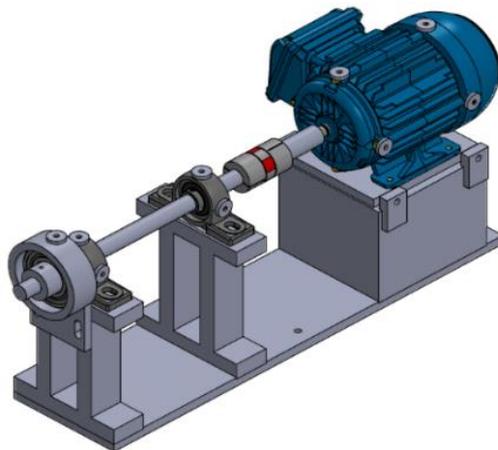


Figura 1-4: Módulo de simulación delineado en SolidWorks.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C.2022

4.2. Constatación de la construcción del módulo de simulación

El módulo de simulación construido se muestra en la figura 2-4, que a continuación se presenta, en el cual se puede observar que cuenta con los delineamientos adecuados para su buen funcionamiento. Todo el proceso constructivo se evidencia en el capítulo 3.4.

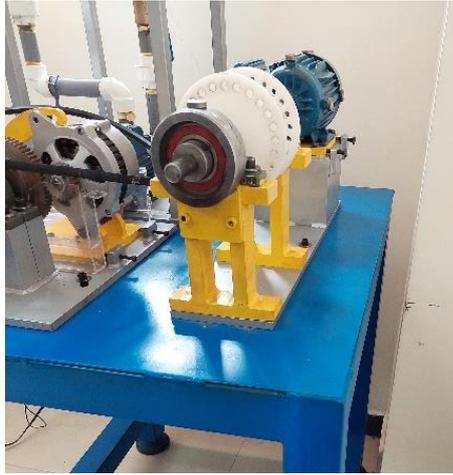


Figura 2-4: Módulo de simulación ensamblado.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

4.3. Elaboración del manual de operación

El manual de operación ayudará a los estudiantes de la asignatura de diagnóstico técnico y eficiencia energética de la ESPOCH, a operar de una manera correcta y adecuada el módulo de simulación de fallas en rodamientos, mediante la asignación de actividades a cumplir antes, durante y después de la puesta en marcha del módulo de simulación. En el anexo A se encuentra el manual de operación donde se detallan, las actividades a realizar para el buen funcionamiento del equipo.

Los criterios para la elaboración del manual de operación son que los estudiantes puedan relacionarse y conocer el módulo de simulación sin haberlo visto anteriormente. Otro aspecto es que los usuarios del módulo de simulación puedan identificar de forma efectiva los procedimientos a seguir antes, durante y después de utilizar el módulo de simulación. Se utilizó imágenes para ayudar a identificar las partes del módulo. Además, se brinda información de qué hacer en casos de emergencia.

4.4. Elaboración de la guía práctica de laboratorio

Se elaboró la guía práctica de laboratorio tomando en cuenta el objetivo del módulo de simulación, el cual es ayudar a los estudiantes al diagnóstico vibracional de fallas en rodamientos. Contiene una secuencia de pasos que concluyen con el análisis de espectros y la obtención de las frecuencias características de cada una de las pruebas. La guía de laboratorio completa se encuentra en el anexo B.

Para la elaboración de la guía práctica de laboratorio se utilizaron criterios como, que proporcione información del diagnóstico vibracional de fallas en rodamientos y de sus procedimientos. Asimismo, que guíe el aprendizaje de los alumnos al enseñar a analizar los espectros obtenidos, ayudar a organizar los valores de armónicos, comparar mediciones. Otro aspecto es que apoye a ejercitar habilidades en la manipulación de herramientas mecánicas e instrumentos de diagnóstico vibracional. Además, que permita evaluar los conocimientos y habilidades puestos en práctica.

4.5. Elaboración del plan de mantenimiento

El plan de mantenimiento fue elaborado con el fin de mantener el módulo de simulación siempre disponible, se asignaron tareas de mantenimiento en las cuales se pueda utilizar otros instrumentos del laboratorio de diagnóstico técnico, para que los estudiantes puedan poner en práctica otras técnicas de mantenimiento basado en la condición. El plan de mantenimiento completo se encuentra en el anexo C.

Para la elaboración del plan de mantenimiento se utilizó la metodología basada en recomendaciones del fabricante. Los principales factores que se tomaron en cuenta al momento de la asignación de tareas de mantenimiento y sus frecuencias fueron: primero, las sugerencias que hacían los fabricantes de las chumaceras, motor eléctrico y acople; además, se tomó en cuenta que el módulo de simulación no va a tener un trabajo diario a lo largo del año. En segundo lugar, se incentivó al uso de instrumentos de diagnóstico técnico, disponibles en el laboratorio. Por último, como particularidad, el módulo de simulación consta de un tablero eléctrico, el cual contiene varios elementos electrónicos que son sensibles a la manipulación, por lo que se asignó un barrido termográfico a los contactos de estos elementos para evitar la manipulación.

4.6. Comparación de mediciones

4.6.1. Comparación de las frecuencias de fallo

Rodamiento con falla en la pista externa.

Se realizó el siguiente gráfico que ayude a la interpretación y comparación de resultados obtenidos de las tablas 11-3, 12-3 y 13-3.

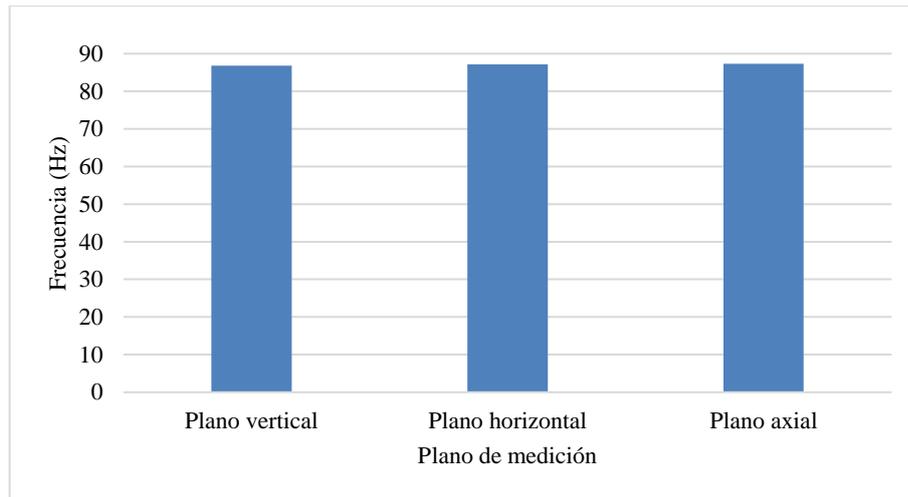


Gráfico 1-4: Comparación de la medición del BPFO en diferentes planos.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

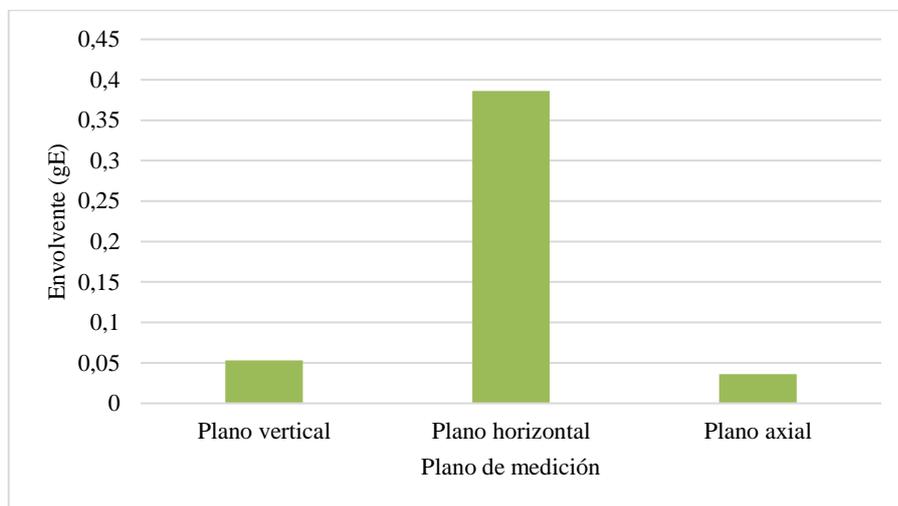


Gráfico 2-4: Comparación de la amplitud de la envolvente para el BPFO.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

Interpretación:

De acuerdo con el gráfico 1-4, la frecuencia medida en los tres planos de medición tienen similitud y no varían con gran diferencia. Se puede observar como la medición tomada en el plano axial es la más alta con un valor de 87,325 Hz y la más baja se encuentra en el plano vertical con una frecuencia de 86,844 Hz, por lo que no hay mayor variación. En la gráfica 2-4, el valor de amplitud de envolvente en el plano horizontal es alto, con un valor de 0,386 gE, mientras que las magnitudes en el plano vertical y axial son similares.

Rodamiento con falla en la pista interna.

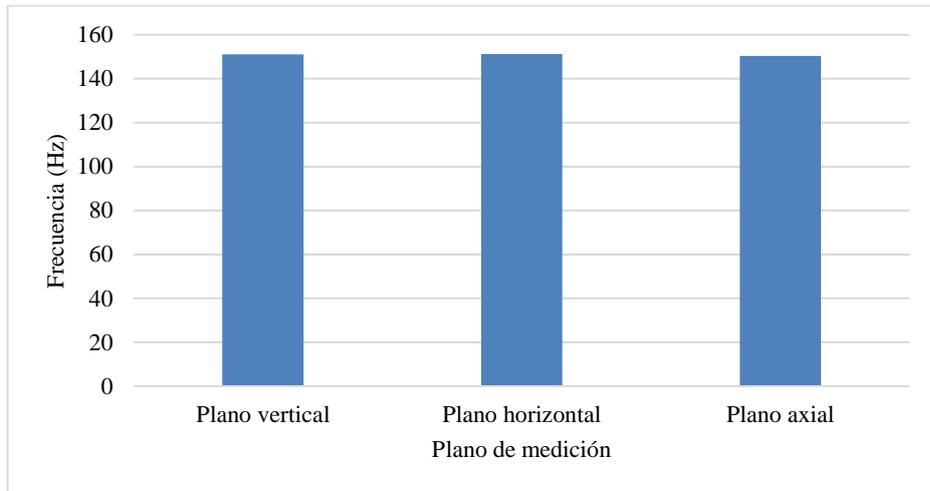


Gráfico 3-4: Comparación de la medición del BPFi en diferentes planos.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

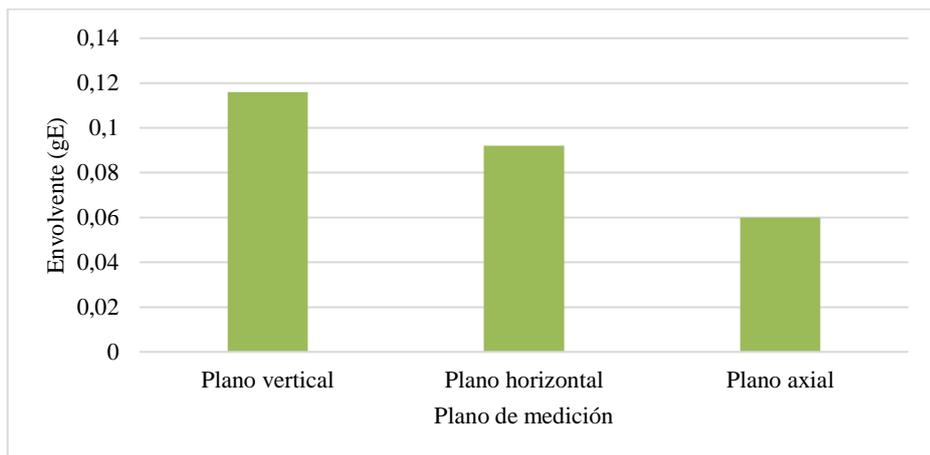


Gráfico 4-4: Comparación de la amplitud de la envolvente para el BPFi.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

Interpretación:

Mediante el gráfico 3-4, observamos como en este caso las mediciones realizadas en el plano vertical y horizontal son muy semejantes, asimismo, la medida obtenida en el plano axial no presenta mayor similitud. En el plano horizontal se obtuvo el valor más alto de frecuencia con un valor de 151,2 Hz. En el gráfico 4-4, se aprecia como la amplitud de la envolvente en el plano vertical tiene un valor mayor en comparación a los demás planos de medición de 0,116 gE.

Rodamiento con falla en la pista externa e interna.

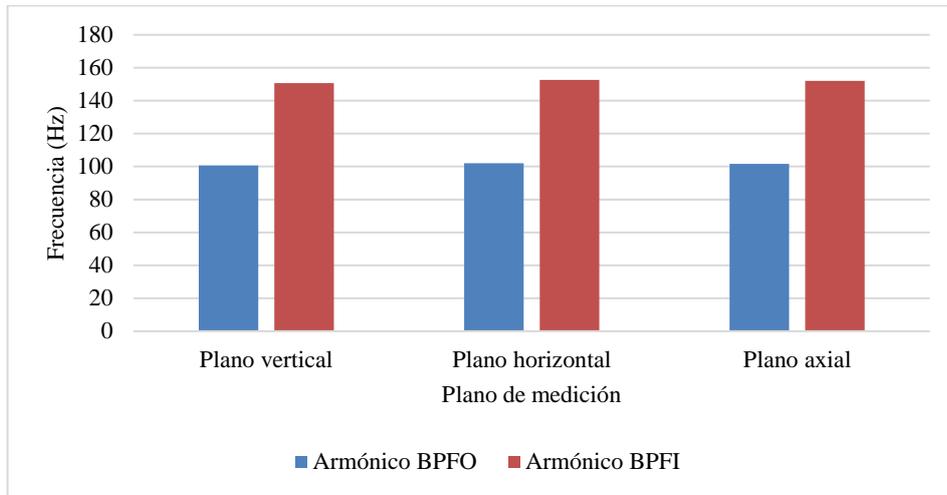


Gráfico 5-4: Comparación de la medición del BPFO y BPFI en diferentes planos.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

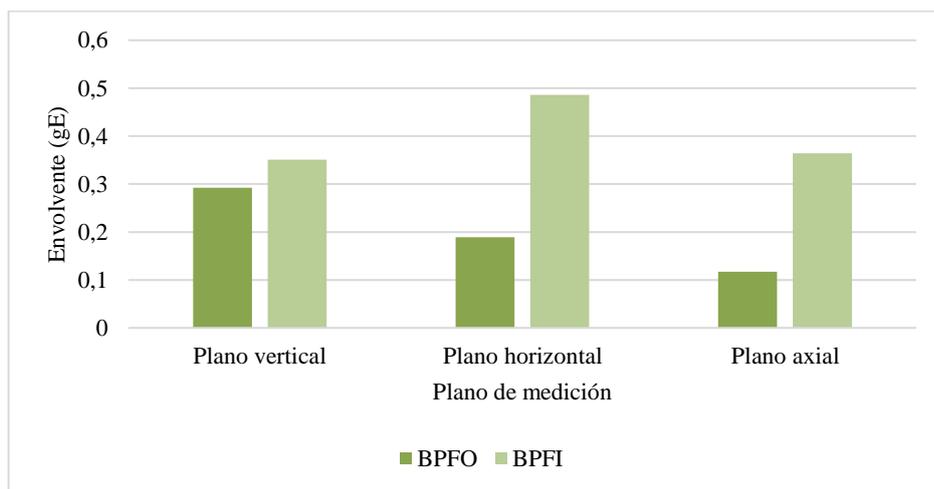


Gráfico 6-4: Comparación de la amplitud de la envolvente para el BPFO y BPFI.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

Interpretación:

Conforme al gráfico 5-4, las mediciones obtenidas de los armónicos BPFO y BPFI son semejantes para cada caso. Analizando las barras del armónico del BPFO la medida más alta de frecuencia se logró en el plano horizontal con un valor de 102,05 Hz; pero las medidas en los demás planos no se diferencian en gran medida con un valor de 0,901 Hz. Por otra parte, en el gráfico 6-4 los valores más altos para la amplitud de la envolvente del BPFO y BPFI se encuentran en los planos vertical y horizontal respectivamente; y tienen valores de 0,292 y 0,486.

CONCLUSIONES

El estudio del estado del arte de las características, potenciales fallas y sus consecuencias sobre los rodamientos, permitió interpretar de manera óptima los cambios que sufren los armónicos del espectro de un rodamiento al someterlo a fallas en la pista interna y externa.

El módulo de simulación que se elaboró proporciona condiciones de funcionamiento fiables al trabajar sin carga y a un par torsional máximo de 2,03 Nm. Para la selección de elementos se consideró una carga radial de 667,23 N, que es la carga máxima que se podrá acoplar al módulo.

Al realizar defectos en diferentes partes del rodamiento, como en la pista interna y en la pista externa, se notó que se generan más frecuencias características de fallo como el BPFO y BPFI. Como se puede evidenciar en el gráfico 5-4, en donde se muestran las frecuencias generadas.

Utilizando el gráfico 2-4, en donde se comparan las amplitudes de los armónicos generadas en el rodamiento con falla en la pista externa, se obtuvo que el punto de medición que refleja de mejor manera el defecto realizado es el horizontal, con un valor de 0,386 gE.

Al analizar la gráfica 4-4, el cual compara las amplitudes de los armónicos producidas por el defecto en la pista interna, se concluyó que el punto vertical indica de mejor manera la falla provocada en el rodamiento con una amplitud de envolvente de 0,116 gE.

Al analizar el gráfico 6-4, en donde se cotejan las amplitudes de los armónicos provocadas por los defectos en la pista externa e interna, se observó que para la detección del BPFO y BPFI el mejor punto de medición es el vertical para la detección del BPFO, y horizontal para el BPFI, con valores como 0,292 gE y 0,486 gE respectivamente.

En los gráficos 2-4, 4-4 y 6-4, en donde se compara la amplitud de los armónicos, se notó que en todos los casos el valor de la amplitud más pequeño se lo midió en el plano axial, lo que dificultaría la detección de fallos en esta dirección, pero no sería imposible realizarlo.

RECOMENDACIONES

Inducir fallas en otros tipos de rodamientos para estudiar el comportamiento que tienen al someterlos a un trabajo continuo.

Adquirir un nuevo equipo de medición de vibraciones para agilizar el proceso de recolección de datos, ya que el laboratorio de diagnóstico técnico y eficiencia energética cuenta con solo uno de estos equipos.

Utilizar un método de diagnóstico adicional al empleado, como por ejemplo el método de diagnóstico de análisis de ultrasonido, para observar las diferencias y similitudes entre técnicas, como la facilidad para interpretar espectros, y la duración de la medición de vibraciones.

BIBLIOGRAFÍA

BENALI, J., SAYADI, M., FNAIECH, F., MORELLO, B. y ZERHOUNI, N. "Importance of the fourth and fifth intrinsic mode functions for bearing fault diagnosis". *14th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering* [en línea], 2013, pp. 259-264. [Consulta: 22 julio 2021]. Disponible en: DOI 10.1109/STA.2013.6783140.

BESA, A. y CARBALLEIRA, J. *Diagnóstico y corrección de fallos de componentes mecánicos* [en línea]. 2a. ed. 2018. [Consulta: 12 julio 2021]. Disponible en: <https://elibro.net/es/ereader/epoch/57456>.

BLANCO, J. y MELGAREJO, C. Diseño y montaje de un banco de pruebas para detección y clasificación de falla en rodamientos de bolas para máquinas rotativas [en línea] (Trabajo de titulación) (Pre grado). Universidad Autónoma de Bucaramanga, Bucaramanga, Colombia. 2021. pp. 38-39. [Consulta: 2021-07-06]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12749/12168>

CABAÑAS, M.A. Monitorización y Clasificación de Defectos en Rodamientos de Bolas. Estudio Transitorio [en línea] (Trabajo de titulación) (Pre grado). Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España. 2011. pp. 52. [Consulta: 2021-07-06]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10016/11721>.

CARRILLO, A. Estudio de fallas en los rodamientos de la máquina VIBRACOM [en línea] (Trabajo de titulación) (Pre grado). Universidad Central «Marta Abreu» de las Villas, Santa Clara, Cuba. 2013. pp. 16-20. [Consulta: 2021-07-07]. Disponible en: <http://dspace.uclv.edu.cu:8089/handle/123456789/2421>

CASTELLI, M. y ANDRADE, M. "Metodología de monitoreo, detección y diagnóstico de fallos en motores asíncronos de inducción". *Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica* [en línea], 2007, no. 5, pp. 65-76. [Consulta: 25 julio 2021]. ISSN 1510-7450. Disponible en: <http://revistas.um.edu.uy/index.php/ingenieria/article/view/256/315>

CONG, F., CHEN, J., DONG, G. y PECHT. "Vibration model of rolling element bearings in a rotor-bearing system for fault diagnosis". *Journal of Sound and Vibration* [en línea], 2013, vol. 332, no. 8, pp. 2081-2097. [Consulta: 16 julio 2021]. ISSN 0022460X. Disponible en:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2012.11.029>.

DAZA, G. *Vibraciones Mecánicas* [en línea]. Valparaíso, Chile: Universidad Técnica Federico Santa María, 2007. [Consulta: 05 junio 2021]. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/80325593/Mantenimiento-Predictivo>

EL-THALJI, I. y JANTUNEN. "Dynamic modelling of wear evolution in rolling bearings". *Tribology International* [en línea], 2015, vol. 84, pp. 90-99. [Consulta: 03 agosto 2021]. ISSN 0301679X. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2014.11.021>.

FAG. *Averías de los rodamientos* [en línea]. 2002. [Consulta: 05 julio 2021]. Disponible en: https://www.rodaunion.es/media/imagenes/Catalogos/Rodamientos%20y%20accesorios/FAG/Averias_de_Rodamientos_WL82102-2_SB_0502.pdf

GÓMEZ, V. *Selección de materiales - Materiales Metálicos* [en línea]. Tucumán, Argentina: Universidad Tecnológica Nacional, 2017. [Consulta: 28 junio 2021]. Disponible en: <https://docplayer.es/25138791-Seleccion-de-materiales.html>

GONZALEZ, B. y QUISPE, R. Comparación de la efectividad de las técnicas de ultrasonido pasivo y análisis de vibraciones en la detección de fallas incipientes en rodamientos [en línea] (Trabajo de titulación) (Pre grado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. 2015. pp. 21. [Consulta: 2021-07-07]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/4571/1/25T00267.pdf>.

IBÁÑEZ, H.I. Análisis de fallas en rodamientos por medición de vibración [en línea] (Trabajo de titulación) (Pre grado). Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. 2011. pp. 18. [Consulta: 2021-07-10] Disponible en: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2011/bmfci.12a/doc/bmfci.12a.pdf>.

JANTUNEN, E., HOOGHOUDT, J.O., YANG, Y. y MCKAY, M. "Predicting the remaining useful life of rolling element bearings". *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology* [en línea], 2018, pp. 2035-2040. [Consulta: 13 junio 2021]. ISBN 9781509059492. Disponible en: DOI 10.1109/ICIT.2018.8352501.

KHADERSAB, A. y SHIVAKUMAR, S. "Vibration Analysis Techniques for Rotating Machinery and its effect on Bearing Faults". *Procedia Manufacturing* [en línea], 2018, vol. 20,

pp. 247-252. [Consulta: 06 agosto 2021]. ISSN 23519789. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.036>.

LOVEJOY. *Catálogo de acoplamientos LoveJoy Jaw* [en línea]. 2018. [Consulta: 06 julio 2021]. Disponible en: <https://pdf.directindustry.es/pdf-en/lovejoy/jaw/7199-806855.html>

MEDRANO-HURTADO, Z.Y., PÉREZ-TELLO, C., GÓMEZ-SARDUY, J. y VERA-PÉREZ, M. "Nueva metodología de diagnóstico de fallas en rodamientos en una máquina síncrona mediante el procesamiento de señales vibro-acústicas empleando análisis de densidad de potencia". *Ingeniería, Investigación y Tecnología* [en línea], 2016, vol. 17, no. 1, pp. 73-85. [Consulta: 11 agosto 2021]. ISSN 14057743. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.riit.2016.01.007>.

MORENO, M. Diagnóstico de fallas en rodamientos utilizando vibraciones mecánicas [en línea] (Trabajo de titulación) (Pre grado). Universidad de Antioquía, Medellín, Colombia. 2018. pp 31. [Consulta: 2021-07-08]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10495/12239>

MOTT, R. *Diseño de elementos de máquinas* [en línea]. 4a. ed. México: Pearson Education, 2006. [Consulta: 28 junio 2021]. Disponible en: https://www.academia.edu/38450613/Dise%C3%B1o_de_elementos_de_m%C3%A1quinas_pdf

MUÑOZ, C. y VERA, Á. Establecimiento de una base de datos de señales de vibraciones mecánicas y acústicas de un sistema mecánico rotativo con la combinación de fallos de rodamientos y engranajes helicoidales, y elaboración de guía de práctica para desbalanceo estático [en línea] (Trabajo de titulación) (Pre grado). Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador. 2015. pp. 22-23. [Consulta: 2021-07-13]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/8920>

NSK. *Bearing Doctor - Bearing Maintenance Guide* [en línea]. 2018. [Consulta: 06 julio 2021]. ISSN 00188190. Disponible en: <http://www.nskamericas-literature.com/en/bearing-doctor/>.

NSK. *Oxidación y corrosión* [blog]. [Consulta: 06 diciembre 2021]. Disponible en: <https://www.nskamericas.com/es/services/troubleshooting/damage-by-type/rust-and-corrosion.html>

OJEDA, B.L. MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN EL SISTEMA PROPULSIVO NAVAL [en línea] (Trabajo de titulación) (Pre grado). Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. 2010. pp. 16-19. [Consulta: 2021-07-06]. Disponible en: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2010/bmficio.39m/doc/bmficio.39m.pdf>

OTEGUI, J.L. *Análisis de fallas: Fundamentos y aplicaciones en componentes mecánicos* [en línea]. Mar del Plata: EUDEM, 2015. [Consulta: 16 junio 2021]. Disponible en: <https://elibro.net/es/ereader/epoch/77012>.

PALOMINO MARÍN, E. *Elementos de Medición y análisis de vibraciones de Máquinas Rotatorias*. 5. La Habana-Cuba: 2007. ISBN 959-261-043-6, pp. 108-171.

PATIDAR, S. y SONI, P. "An Overview on Vibration Analysis Techniques for the Diagnosis of Rolling Element Bearing Faults". *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)* [en línea], 2013, vol. 4, no. 5, pp. 1804-1809. [Consulta: 05 julio 2021]. ISSN 2231-5381. Disponible en: <http://ijettjournal.org/archive/ijett-v4i5p97>.

RAI, A. y UPADHYAY, S.H. "A review on signal processing techniques utilized in the fault diagnosis of rolling element bearings". *Tribology International* [en línea], 2016, vol. 96, pp. 289-306. [Consulta: 09 agosto 2021]. ISSN 0301679X. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2015.12.037>.

RODRÍGUEZ, J.A. Diseño y construcción de un dispositivo para evaluar la resistencia al desgaste en rodamientos recubiertos a base de fricción seca con diamante [en línea] (Trabajo de titulación) (Pre grado). Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, México. 2003. pp. 40. [Consulta: 2021-07-12]. Disponible en: <https://www.cenidet.edu.mx/subplan/biblio/seleccion/Tesis/MM%20Jose%20Alfredo%20Rodriguez%20Ramirez%202003.pdf>

SÁNCHEZ, F., PÉREZ, A., SANCHO, J. y RODRÍGUEZ, P. *Mantenimiento Mecánico de Máquinas* [en línea]. 2a. ed. Castellón de la Plana-España: Publicacions de la Universitat Jaume I., 2013. [Consulta: 09 junio 2021]. Disponible en: <https://elibro.net/es/ereader/epoch/42317>.

SANTAMARÍA, I., PANTALEÓN, C. y IBAÑEZ, J. "Comparative study of high-accuracy frequency estimation methods". *Mechanical Systems and Signal Processing* [en línea], 2000, vol. 14, no. 5, pp. 819-834. [Consulta: 13 julio 2021]. ISSN 08883270. Disponible en: DOI

10.1006/mssp.2000.1321.

SKF. *Daño de rodamientos y análisis de fallas* [en línea]. 2017. [Consulta: 06 julio 2021]. Disponible en: https://www.skf.com/binaries/pub201/Images/0901d196807d76f8-Bearing-failures---14219_2-ES-AR_tcm_201-297619.pdf

SKF. *Rodamientos* [en línea]. 2019. [Consulta: 06 julio 2021]. Disponible en: https://www.skf.com/binaries/pub201/Images/0901d19680416953-Rolling-bearings---17000_1-ES_tcm_201-121486.pdf

SKF. *Catálogo de unidades de rodamientos de bolas* [en línea]. [Consulta: 06 julio 2021]. Disponible en: https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d196802a2b8f-13728-EN-Y-bearing-and-Y-b-units_tcm_12-129182.pdf#cid-129182

SMILOVIC, A. Análisis, Determinación y Características de Falla en Rodamientos Utilizados en la Cadena Cinemática de un Filtro de Banda y Propuesta de Aplicación para un Plan Correctivo e Implementación de Nuevas Tecnologías de Lubricación [en línea] (Trabajo de titulación) (Pre grado). Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile. 2017. pp. 124. [Consulta: 2021-07-18]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11673/23001>.

TAYLOR, J. *The Vibration Analysis Handbook - A practical guide solving rotary Machinery Problems*. Vibration Consultants, 2003. ISBN 0964051729, pp. 178-189.

TIMKEN. *Análisis de daños en los rodamientos Timken y Guía de referencia sobre lubricación* [en línea]. 2015. [Consulta: 06 julio 2021]. Disponible en: <https://www.timken.com/resources/5892sp-analisis-de-dan%CC%83os-en-rodamientos-timken-y-guia-de-referencia-sobre-lubricacion/>

VELARDE, X.A. . Estudio para la implementación del tema "Análisis de vibraciones en motores eléctricos" en la materia de máquinas II de la carrera de Ingeniería Eléctrico - Mecánica [en línea] (Trabajo de titulación) (Pre grado). Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador. 2014. pp. 33. [Consulta: 2021-07-19]. Disponible en: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/1787/1/T-UCSG-PRE-TEC-IEM-21.pdf>

WEG. *Catálogo W22 Motor Trifásico* [en línea]. [Consulta: 30 junio 2021]. Disponible en: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h60/h24/WEG-w22-motor-trifasico-50044029->

brochure-spanish-web.pdf

WHITE, G. *Introducción al Análisis de Vibraciones*. U.S.A: Azima DLI, 2010, pp. 11-116.

XU, Y., ZHANG, K., MA, C., LI, X. y ZHANG, J. "An improved empirical wavelet transform and its applications in rolling bearing fault diagnosis". *Applied Sciences (Switzerland)* [en línea], 2018, vol. 8, no. 12, pp. 24. [Consulta: 07 agosto 2021]. ISSN 20763417. Disponible en: DOI 10.3390/app8122352.

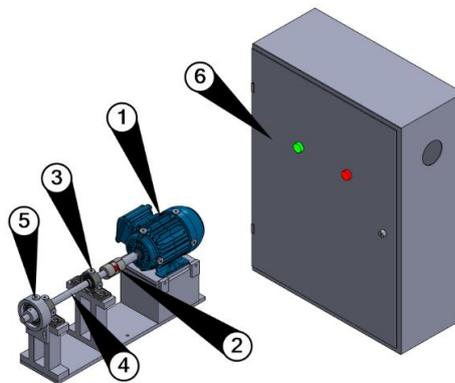
ANEXOS

ANEXO A: MANUAL DE OPERACIÓN

Manual de operación para el módulo de simulación de fallas en rodamientos

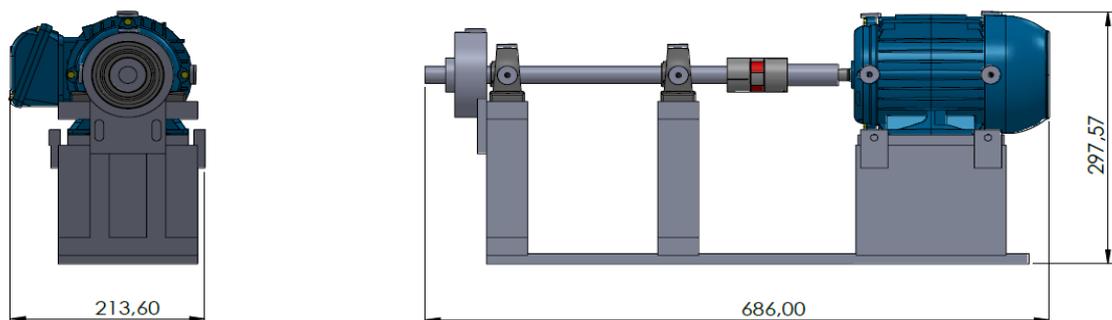
1. Información sobre el módulo de simulación de fallas en rodamientos

Las siguientes ilustraciones muestran diversas características típicas del módulo de simulación de fallas en rodamientos:

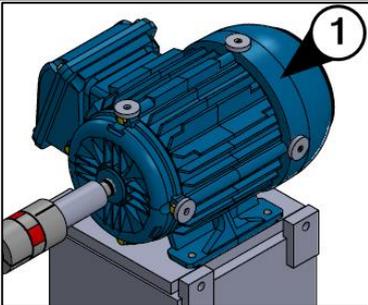
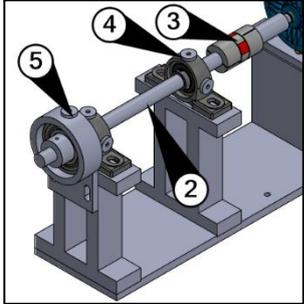
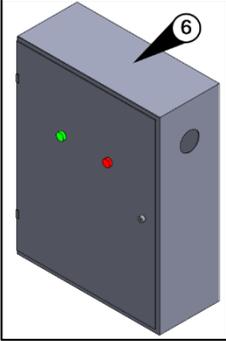


(1) Motor WEG W22	(3) Chumacera P204	(5) Mecanismo de sujeción
(2) Acople Lovejoy L075	(4) Eje de transmisión	(6) Tablero de control

Dimensiones generales del módulo de simulación:



Descripción del módulo de simulación:

Unidad	Descripción	Figura
Motor eléctrico	El motor eléctrico WEG W22 IE2 (1), es el encargado de entregar el movimiento rotacional constante (de 1700 rpm) al módulo de simulación de fallas en rodamientos.	
Banco de pruebas	Consta de: eje de transmisión (2), acople Lovejoy L075 (3), chumaceras P204 (4), mecanismo de sujeción (5). Componentes que son indispensables para la simulación de fallas.	
Tablero de control	El módulo de simulación está equipado de un tablero de control (6), confiable y requiere bajo mantenimiento. Consta de un PLC, variador de frecuencia, elementos de control y potencia. Proporciona control preciso de los siguientes factores: Voltaje, y velocidad de giro del motor eléctrico.	

Especificaciones generales del módulo de simulación:

Como se puede observar en la tabla 3 se muestran los parámetros con los que trabajara el módulo de simulación

Estas especificaciones son necesarias tomarlas en cuenta ya que brindan los parámetros de funcionamiento del módulo, por ejemplo, el límite de velocidad del motor eléctrico.

Especificaciones técnicas			
Equipo	Descripción	Unidad	Valor
Motor eléctrico	Frecuencia	Hz	60
	Velocidad	rpm	1700
	Voltaje	V	220/380
	Potencia	KW	0,37
	Torque nominal	Nm	4,2
Tablero eléctrico	Variación de velocidad	rpm	0 - 1700

Acople flexible Lovejoy L-075	Boquilla	in	7/16
	Diámetro exterior	in	0,5
	Dientes	#	3
Eje de transmisión	Longitud	mm	380
	Diámetro	mm	20
	Dureza	HB	≤ 207 HB
Chumacera SKF SYK 20 TF	Diámetro interior	mm	20
	Capacidad de carga básica dinámica	kN	12,7
Rodamiento de prueba SKF 6208-2RS1	Diámetro interior	mm	40
	Diámetro exterior	mm	80
	Capacidad de carga básica dinámica	kN	25,1

2. Antes de operar

Encendido y apagado del módulo

- El encendido y apagado del módulo de simulación de fallos en rodamientos se hace solamente por medio del tablero de control. Antes de encender el módulo de simulación se debe inspeccionar la unidad motriz, la unidad de transmisión y la unidad de pruebas.
- Al encender o apagar el módulo de simulación, hágalo de frente al tablero de control, cierre la tapa de este una vez encendido o apagado.
- No reemplace el rodamiento de prueba mientras el módulo de simulación está en marcha.

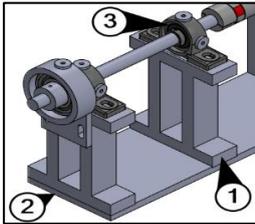
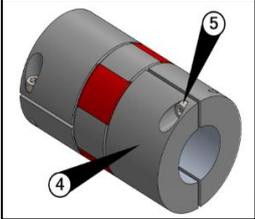
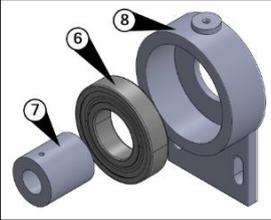
Inspección

- Los componentes calientes pueden causar lesiones personales, no permita el contacto directo de la piel con componentes calientes.
- Antes de arrancar el módulo de simulación, efectúe el mantenimiento periódico que se deba realizar. Realice tareas de mantenimiento preventivo.
- Asegúrese de que las áreas alrededor de las piezas giratorias estén despejadas.

3. Montaje del módulo de simulación de fallos en rodamientos

La unión de los elementos del módulo de simulación de fallos en rodamientos, es de tipo no permanente, para reducir los tiempos de montaje y desmontaje, y facilitar la manipulación.

El tipo de unión no permanente es de tipo roscada.

Tipo de montaje para el módulo de simulación de fallas en rodamientos	Descripción
<p>Montaje no permanente</p> <p>El montaje de las bases de las chumaceras (1), sobre la base del módulo (2), se realiza mediante la sujeción por pernos de cabeza avellanada hueca, realizado este procedimiento se ensambla las chumaceras (3), sobre las bases de estas, utilizando pernos hexagonales y arandelas, el ajuste es posible gracias a las roscas en las bases de las chumaceras.</p>	 <p>Este diagrama ilustra el montaje de las chumaceras. Se muestra una base del módulo (2) con una chumacera (1) montada sobre ella. Una chumacera (3) se está montando sobre la base (1) utilizando un perno hexagonal y una arandela. El ajuste se logra gracias a las roscas en las bases de las chumaceras.</p>
<p>La sujeción y el apriete del acople flexible (4), se lo realiza mediante el ajuste de tornillos (5), formando un solo elemento de rotación.</p> <p>Esto permite que el módulo de simulación pueda cumplir con su función, que es simular fallos en rodamientos.</p>	 <p>Este diagrama muestra un acople flexible (4) que se sujeta y aprieta mediante tornillos (5). El acople flexible está montado sobre un eje y se ajusta mediante los tornillos para formar un solo elemento de rotación.</p>
<p>El mecanismo de sujeción:</p> <p>Para armar el mecanismo de sujeción se inserta el rodamiento de prueba (6), en el bocín (7), para luego insertar el anterior conjunto en el porta-rodamiento (8), y por último se ajusta el mecanismo por medio de un perno hexagonal hueco M4.</p>	 <p>Este diagrama muestra el mecanismo de sujeción. Se muestra un rodamiento de prueba (6) que se inserta en el bocín (7). El conjunto se inserta en el porta-rodamiento (8) y se ajusta mediante un perno hexagonal hueco M4.</p>

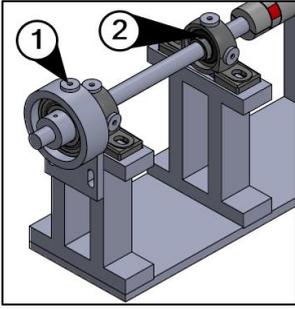
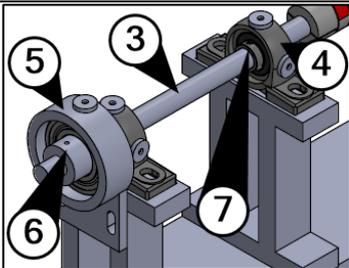
Nota:

Con el fin de que el rodamiento opere favorablemente y que el resultado de las mediciones de vibraciones sean las más acertadas posibles, el montaje debe realizarse en un área limpia libre de virutas o polvo.

Al reemplazar un porta rodamiento, el nuevo no debe golpearse por ningún motivo hasta el momento de su montaje. Primero, se debe limpiar el bocín, para luego montar el porta rodamiento utilizando el martillo de goma, empujando la cara frontal del bocín.

Si por alguna razón el montaje del porta rodamiento se atasca, se procederá engrasar el aro interior del bocín. Con la ayuda del martillo de goma se procede nuevamente al montaje del porta rodamiento, empujando la cara frontal del bocín.

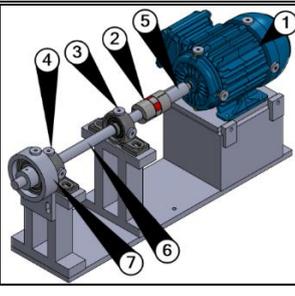
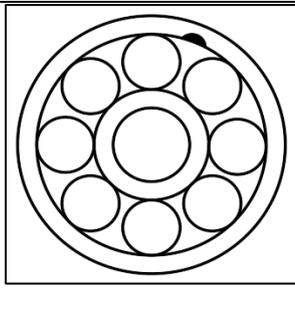
Ya teniendo todo el porta rodamiento montado en el eje de transmisión, se debe ajustar el porta rodamiento con pernos hexagonales y el bocín con un prisionero.

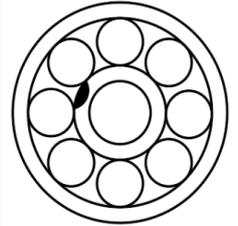
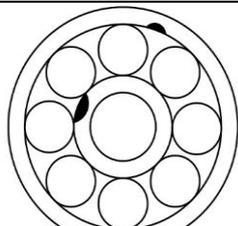
Tipo de ajuste	Descripción
<p>El ajuste de los elementos del módulo de simulación es de tipo móvil como el mecanismo de sujeción de rodamientos (1), excepto con el ajuste de las chumaceras (2), que es de tipo fijo, ya que, las pruebas se realizarán en el mecanismo de sujeción, y tendremos mayor facilidad al momento de intercambiar los rodamientos con defectos y buen estado.</p>	
<p>Con el objetivo de evitar el deslizamiento de tipo axial y por esfuerzos de torque del eje (3,) sobre las chumaceras (4,) y el mecanismo de sujeción de rodamientos (5), se utilizará prisioneros (6)(7) en cada punto de apoyo del eje.</p>	

4. Simulación de fallos en rodamientos

Las simulaciones de fallos se realizarán en cuatro rodamientos, uno con falla en la pista externa, con falla en la pista interna, en condición normal, y otro con fallas en la pista externa e interna.

Los elementos utilizados para desarrollar esta prueba son los siguientes:

<ol style="list-style-type: none"> 1. Motor. 2. Acople flexible Lovejoy L-075. 3. Chumacera P204. 4. Chumacera P204. 5. Eje secundario. 6. Eje principal. 7. Mecanismo de sujeción de rodamientos. 	
<p>Pista externa</p> <p>Para el primer rodamiento se provoca un defecto en la pista externa, lo que genera un espectrograma característico de esta falla, obtenido al procesar las mediciones de vibraciones.</p>	

<p>Pista interna</p> <p>Para esta prueba se provoca un defecto en la pista interna, al realizar las mediciones y procesar las señales, obtenemos un espectrograma con diferentes frecuencias diferentes a la anterior prueba.</p>			
<p>Pista interna – pista externa</p> <p>Se provocaron defectos en la pista interna y externa del rodamiento, los espectros resultantes presentan picos diversos y en gran número, debido a la combinación de fallas, diferenciándose así de las demás pruebas.</p>			

Una vez realizado el ensayo con el primer porta rodamiento que contiene un rodamiento con falla en la pista externa, se lo reemplaza por un nuevo porta rodamiento que contiene un rodamiento con otro tipo de falla, que puede ser en la pista interna o en la pista externa e interna, y por último se realiza el ensayo en el rodamiento en condición normal. Hay que tener presente que el prisionero y los pernos deben estar correctamente ajustados en todos los ensayos.

5. Parada del módulo de simulación

Parada de emergencia

Este sistema se encuentra en el tablero de control, y sirve para desenergizar el módulo de simulación en caso de una emergencia o de sobre velocidad. Los dispositivos de emergencia no deben usarse durante el procedimiento normal de parada.

Procedimiento típico de parada

- Para parar el módulo de simulación, oprima el botón de parada del tablero de control.
- Una vez el módulo de simulación este parado, desconecte el regulador de velocidad y el PLC.

Después de parar el motor

- Verifique que la cantidad de grasa de los componentes sea la óptima.
- Si es necesario, realice ajustes menores. Apriete los pernos flojos.
- Registre las horas de trabajo del módulo de simulación

ANEXO B: GUÍA PRÁCTICA DE LABORATORIO



esPOCH | Carrera de
Mantenimiento
Industrial

GUÍA DE LABORATORIO DE DIAGNÓSTICO TÉCNICO

PRÁCTICA N°

TEMA: “DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN RODAMIENTOS”

1. DATOS GENERALES

NOMBRE	CÓDIGO	% DE PARTICIPACIÓN

GRUPO N°:

DOCENTE:

FECHA DE REALIZACIÓN:

ENTREGA DEL INFORME:

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Realizar análisis de vibraciones a rodamientos, utilizando el analizador de vibraciones Vibracheck y el software MAINTraQ Predictive, para aprender a realizar un diagnóstico vibracional de fallas en rodamientos, identificando además el punto de medición más fiable para cada rodamiento.

2.2. Objetivos específicos

- Efectuar el análisis de vibraciones en rodamientos con defectos y en buen estado.

- Analizar los espectros y tabular los valores de amplitud de los armónicos.
- Realizar gráficos de barras para la comparación de valores de amplitud de los armónicos.
- Seleccionar el mejor punto de medición de acuerdo con la comparación de valores.

3. INTRODUCCIÓN

3.1. Antecedentes

El análisis de vibraciones en rodamientos es una de las técnicas más estudiadas y utilizadas debido a que determina la condición operativa de los equipos, se fundamenta en identificar problemas antes de que se vuelvan demasiado graves. Las fallas en los rodamientos se encuentran entre las causas más comunes en máquinas rotativas. Ya que, los rodamientos son elementos que están expuestos a cargas excesivas, montaje inadecuado, y sobre velocidad. Ocasionando una variedad de fallos. El espectro de vibración proporciona una cantidad de información importante acerca del estado de funcionamiento del rodamiento antes de que se produzca un paro catastrófico afectando la seguridad e integridad de los trabajadores, a nivel industrial. Por lo que se hace indispensable que los estudiantes de la Carrera de Mantenimiento Industrial aprendan a realizar el diagnóstico vibracional de fallas en rodamientos.

3.2. Marco teórico

Los fallos que se puede encontrar en los rodamientos son: falla en la pista interna, falla en la pista externa, desgaste de la jaula y defectos en los elementos rodantes. Cada una de estas fallas generan frecuencias características que son: BPFO para falla en la pista externa, BPFI para falla en la pista interna, FTF para desgaste de la jaula y BSF para falla en los elementos rodantes. Estas frecuencias se reflejan en los espectros obtenidos al realizar un análisis vibracional a los rodamientos con fallas. Al realizar un análisis vibracional en el dominio de la frecuencia, es decir, utilizando espectros, se puede obtener información como: la localización y el tamaño del fallo. La localización del fallo se puede determinar al coincidir la frecuencia del fallo con un armónico del espectro. Asimismo, el tamaño del fallo se puede definir al observar la amplitud del armónico que coincide con una frecuencia de fallo. Además, se puede determinar el mejor punto de medición, realizando una comparación de las amplitudes obtenidas en los diferentes planos de medición, para cada rodamiento.

3.3. Normas

El módulo de simulación dispone de un manual de operación, en donde se especifican los pasos para la utilización de este. Además, el laboratorio cuenta con normas internas que indican la vestimenta necesaria para utilizar las herramientas e instrumentos.

3.4. Precauciones

Se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Antes de encender el módulo de simulación se debe inspeccionar los elementos rotatorios, en búsqueda de elementos intrusivos.
- Se debe realizar el encendido y apagado del módulo de simulación solo mediante el tablero de control.
- Cerra el tablero de control una vez se haya encendido o apagado el módulo de simulación.
- Las patas de la mesa se encuentran empotradas al suelo para disminuir el ruido que se puede obtener al realizar los ensayos. Ajustar los pernos que se utilizaron para realizar este empotramiento al inicio de cada ensayo.

3.5. Prohibiciones

Tener presente las siguientes sugerencias:

- El apagado del módulo de simulación no se lo debe realizar pulsando el botón de parada de emergencia, este debe utilizarse solo en ocasiones de emergencia o sobre velocidad.
- No tocar directamente los elementos del porta rodamientos después de haber estado en movimiento el módulo de simulación, debido a las altas temperaturas que tienen.
- Jamás intentar desmontar el porta rodamientos estando en movimiento el módulo de simulación.

4. METODOLOGÍA

4.1. Armado del porta rodamientos

En primer lugar, tendremos que montar el porta rodamientos, el cual no servirá para poder realizar el análisis de vibraciones en los rodamientos con defectos y buen estado. Para esto hay que seguir con el siguiente procedimiento:

Seleccionamos el primer porta rodamiento, con el cual realizaremos el primer ensayo, como se puede observar en la figura:



Ratificamos que el seguro del rodamiento este correctamente colocado. Lo cual ayudará a evitar el desplazamiento del rodamiento dentro del porta rodamientos, como en la figura:



Después, colocamos el bocín dentro del rodamiento para poder asegurarlo en el eje de transmisión, como se ve en la siguiente figura:

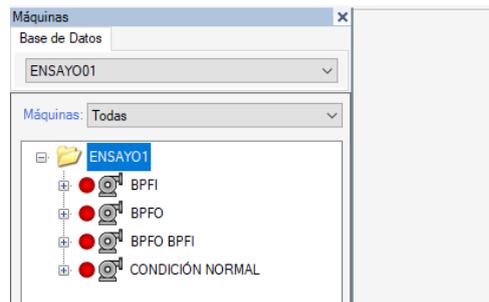


Finalmente, montamos el conjunto en el banco de pruebas, ajustando los pernos y el prisionero, como se puede observar en la figura:

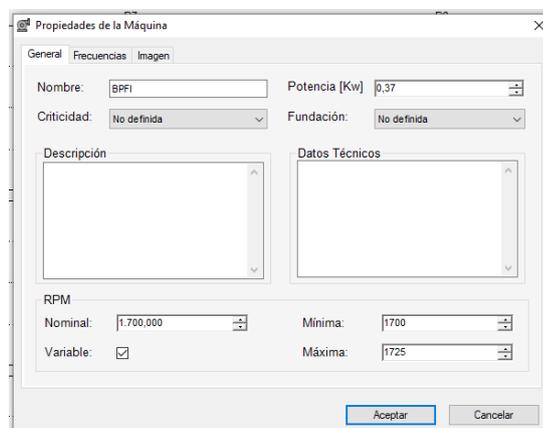


4.2. Configuración del software MAINTraq Predictive

Para realizar los ensayos en los rodamientos se debe crear una nueva base de datos en el software MAINTraq Predictive, en la cual se creará una nueva carpeta en donde están todas las máquinas, que en este caso son los diferentes rodamientos de pruebas.



Para cada rodamiento se debe configurar parámetros como la potencia y la frecuencia de giro del motor.



Además, en cada rodamiento se debe configurar puntos de medición (vertical, horizontal y axial), y se cambiaron las siguientes propiedades para cada punto: el nombre, tipo de sensor, ubicación, la dirección, la frecuencia de giro, el tipo de rodamiento y su lubricación.

The screenshot shows the 'Propiedades del Punto de Vibración' dialog box with the following settings:

- General tab selected.
- Número: 8
- Sensor: Acelerómetro
- Dirección: Horizontal
- Ubicación: Unidad Conducida
- Nombre: BFFH
- Eje: 1
- RPM: Nominal: 1700, Mínima: 1700, Máxima: 1725
- Apoyo: Tipo: Rodamiento, Lubricante: Grasa
- Rodamiento: FAG-6208
- Buttons: Aceptar, Cancelar

En cada punto de medición se añadirán formas de onda (desplazamiento) y espectros (velocidad y envolvente). En las formas de onda se debe configurar la cantidad de muestras (8000), y en los espectros se configura las líneas espectrales (3200) y la cantidad de promedios (4).

The screenshot shows the 'Propiedades del Espectro' dialog box with the following settings:

- Variable: Velocidad
- Medición: Líneas Espectrales: 3200, Frecuencia Máxima: 1200 Hz, Cantidad de Promedios: 4, Frecuencia Mínima: 0 Hz
- Duración de la Medición: 4,37 segundos
- Buttons: Configurar Alarmas, Aceptar, Cancelar

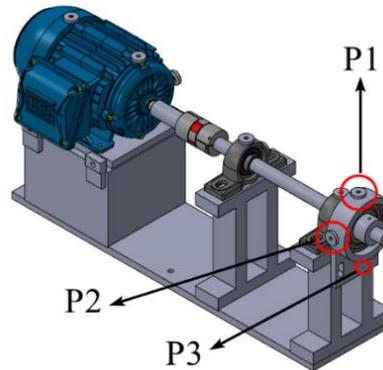
The screenshot shows the 'Propiedades de la Forma de Onda' dialog box with the following settings:

- Variable: Velocidad
- Medición: Cantidad de Muestras: 8000, Frecuencia de Muestreo: 3 KHz
- Duración de la Medición: 2,67 segundos
- Buttons: Aceptar, Cancelar

4.3. Puntos de medición

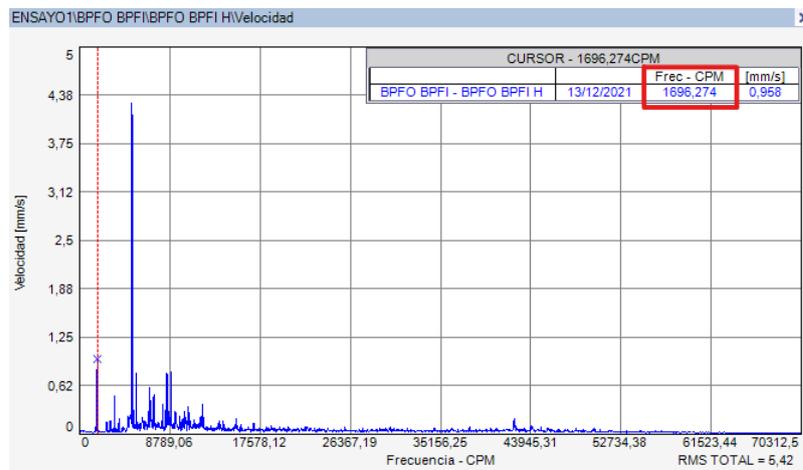
Los puntos donde se realizarán las mediciones de vibraciones se especifican a continuación:

Tipo de falla	Punto de medición
Condición normal	P1, P2, P3
Fallas en la pista interna	P1, P2, P3
Falla en la pista externa	P1, P2, P3
Falla en las pistas interna y externa	P1, P2, P3



4.4. Diagnóstico de fallos

Se debe realizar el análisis de vibraciones en los puntos de medición configurados. Para diagnosticar si el rodamiento presenta fallas es necesario analizar los espectros de velocidad y envolvente. En el espectro de velocidad se detecta el armónico de 1X y se copia los cpm que tenga para poder corregir los cpm del punto de medición.



Propiedades del Punto de Vibración

General Variables

Número: 11 Sensor: Acelerómetro

Dirección: Horizontal Ubicación: Unidad Conducida

Nombre: BPFO BPFH

Eje: 1

RPM

Nominal: 1696,274 Mínima: 1700 Máxima: 1725

Apoyo

Tipo: Rodamiento Rodamiento: FAG-6208

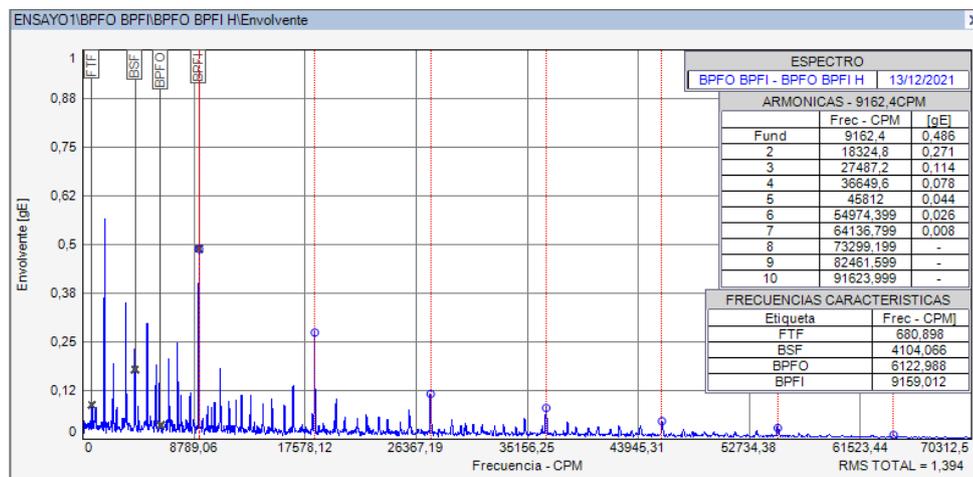
Lubricante: Grasa

Seleccionar

Aceptar Cancelar

Después, accedemos al espectro de envoltente y se activa la herramienta para mostrar las frecuencias características del espectro. En el rodamiento en condición normal los armónicos no coinciden con ninguna frecuencia de fallo, en el caso del rodamiento con falla en la pista externa la frecuencia del BPFO coincide con un armónico, para el rodamiento con falla en la pista interna la frecuencia del BPFH es la coincidente con un armónico, para el caso del rodamiento con falla en la pista externa e interna, la frecuencia del BPFO y BPFH deberán coincidir con un armónico.

Todo este proceso se debe seguir para poder obtener el espectro que nos sirva para diagnosticar una falla, como en la siguiente figura que nos indica la presencia de una falla en la pista interna por la aparición de la frecuencia de falla BPFH.



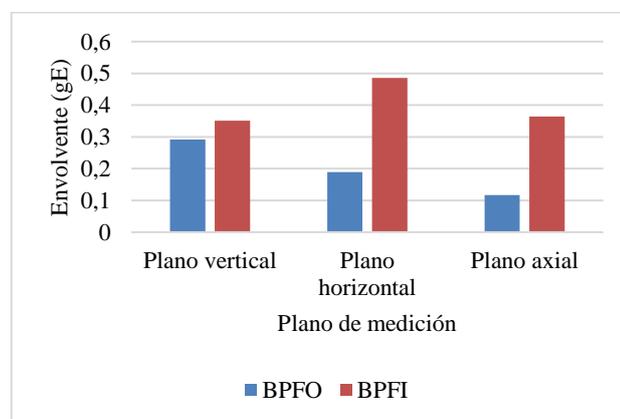
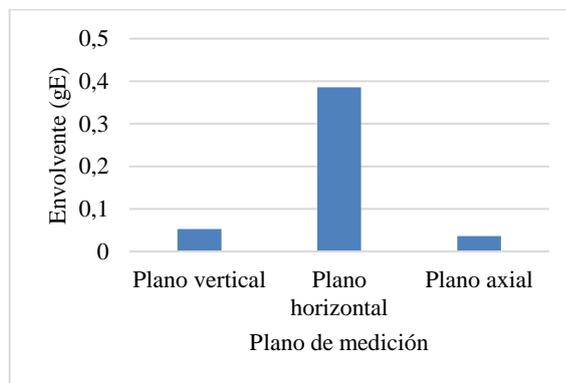
4.5. Comparación de datos

Para poder comparar las mediciones realizadas se tabularán los valores de los armónicos, para posteriormente crear gráficos de barras utilizando Excel. Se debe tabular valores de amplitud.

Los valores de amplitud de cada rodamiento se deberán tabular en las siguientes tablas:

Amplitud \ Armónico	Plano vertical (gE)	Plano horizontal (gE)	Plano axial (gE)
BPFO			
BPFI			
BSF			
FTF			

Para la comparación de la amplitud se deberá utilizar gráficos del siguiente estilo:



En cada ensayo los valores de amplitud deben variar, en donde el valor más alto de amplitud indica el mejor punto de medición para determinada falla.

5. RECURSOS, HERRAMIENTAS Y EQUIPOS

A continuación, se especificará todo lo requerido para realizar la práctica de laboratorio:



- Rodamientos con defectos y en buen estado
- Porta rodamientos
- Analizador de vibraciones Vibracheck
- Software MAINTraQ Predictive
- Juego de llaves Allen milimétrico
- Juego de llaves Allen en pulgadas
- Cable de transmisión de datos
- Cargador del analizador de vibraciones
- Pinza de punta redonda
- Llave inglesa #17
- PC portátil

6. DESCRIPCIÓN DEL DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

A continuación, se describirá la secuencia para el desarrollo de la práctica de laboratorio:

- 6.1. En primer lugar, se debe armar el porta rodamientos, siguiendo con el proceso ya mencionado en el apartado 4.1. Luego se ensamblará el conjunto completo en el banco de pruebas. Hay que tener en cuenta que se debe limpiar los componentes del porta rodamientos antes de acoplarlos.
- 6.2. Después, se realizará la configuración del software MAINTraQ Predictive del punto 4.2., teniendo presente los factores que se debe configurar.
- 6.3. Se realizará la medición de vibraciones en los puntos especificados en el apartado 4.3.
- 6.4. Se realizará el diagnóstico de los fallos presentes en los rodamientos, siguiendo con lo estipulado en el literal 4.4.
- 6.5. Por último, se compararán las mediciones realizadas, tabulando los valores amplitud y después realizando gráficos de barras. Como se puede observar en el literal 4.5.

7. RECOLECCIÓN DE DATOS

En este apartado se deberá colocar los espectros de envolvente de cada plano de medición para cada rodamiento. Estos espectros servirán para identificar las fallas en los rodamientos.

7.1. Rodamiento en condición normal

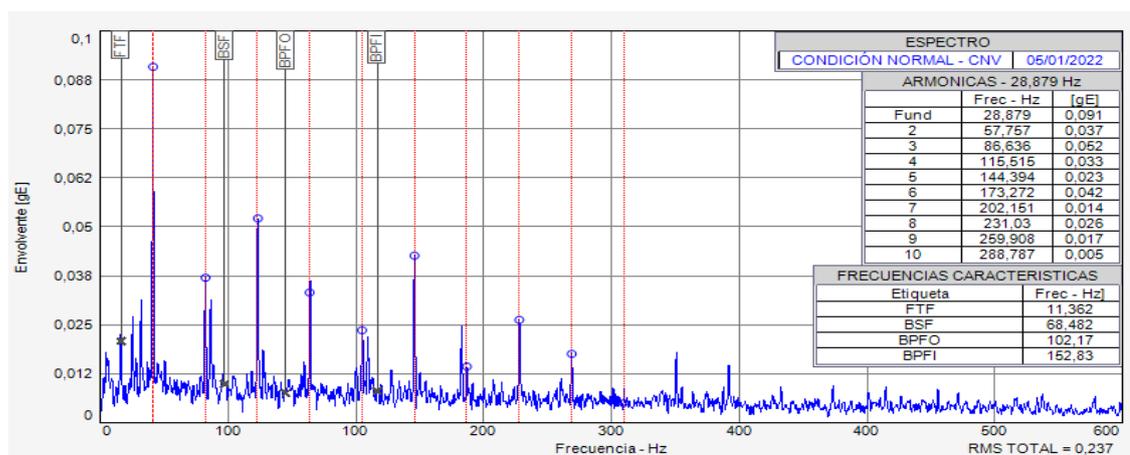


Figura 1: Espectro de envolvente, plano vertical, condición normal.

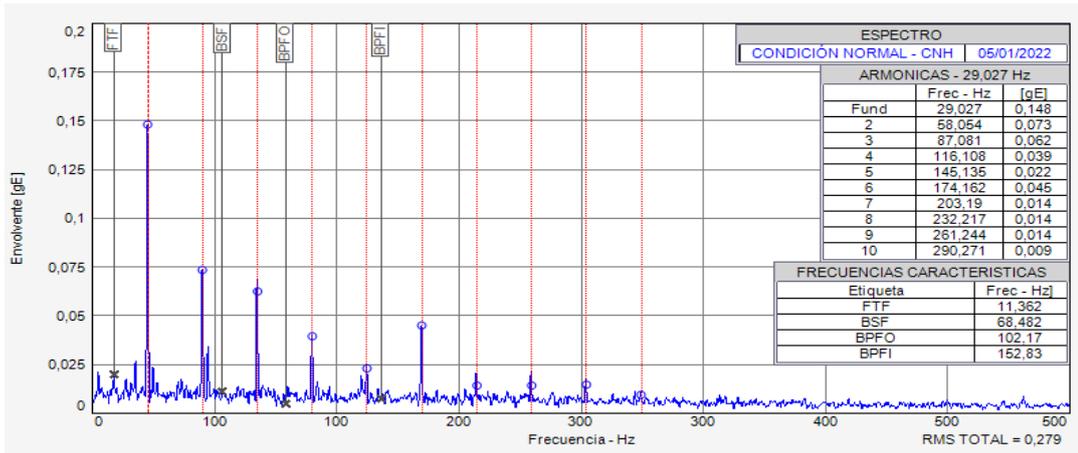


Figura 2: Espectro de envolvente, plano horizontal, condición normal

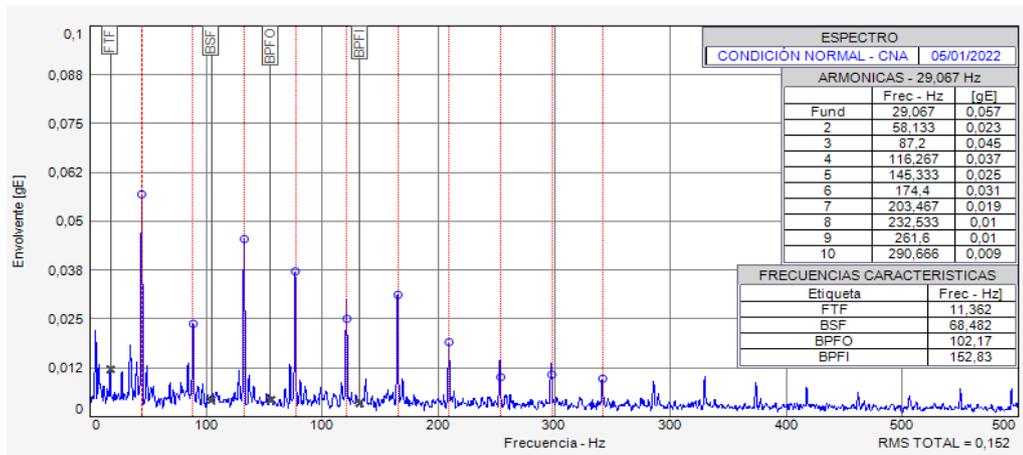


Figura 3: Espectro de envolvente, plano axial, condición normal

7.2. Rodamiento con defecto en la pista externa

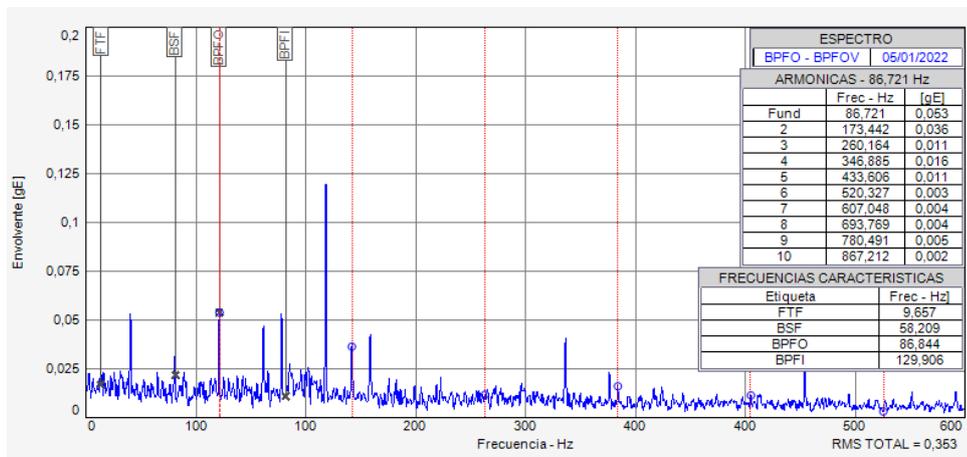


Figura 4: Espectro de envolvente, plano vertical, falla pista externa

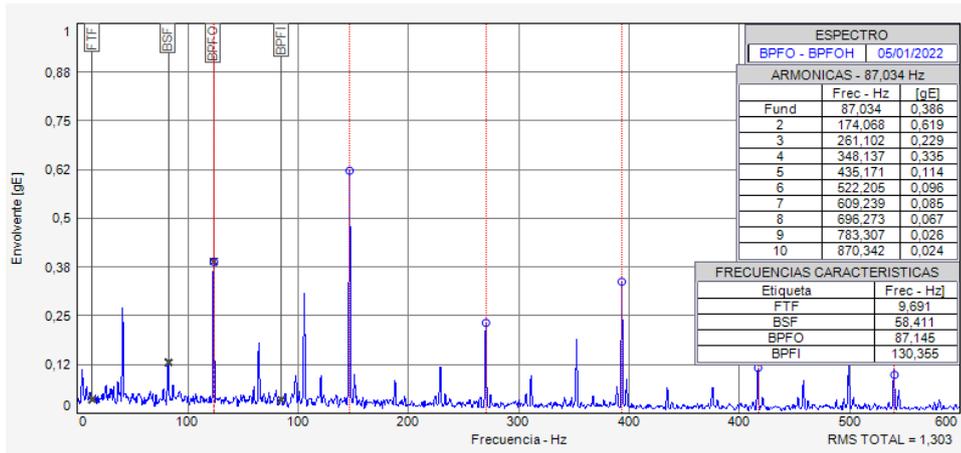


Figura 5: Espectro de envolvente, plano horizontal, falla pista externa

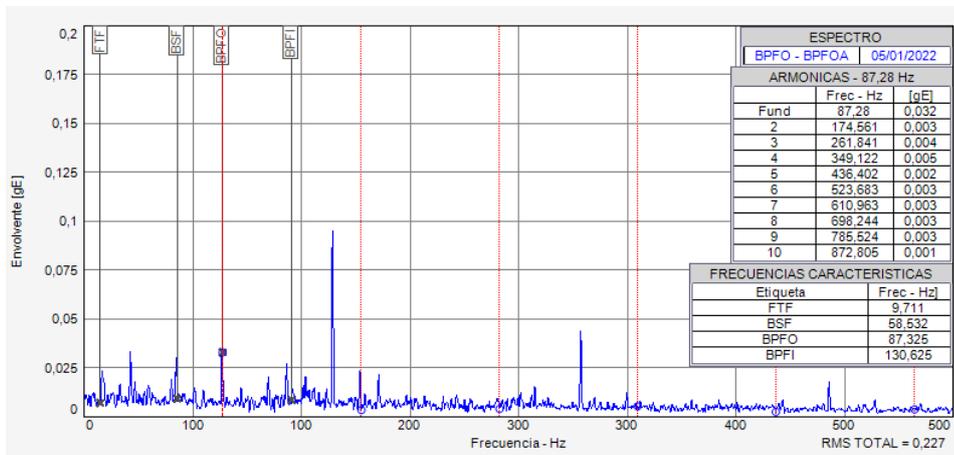


Figura 6: Espectro de envolvente, plano axial, falla pista externa

7.3. Rodamiento con defecto en la pista interna

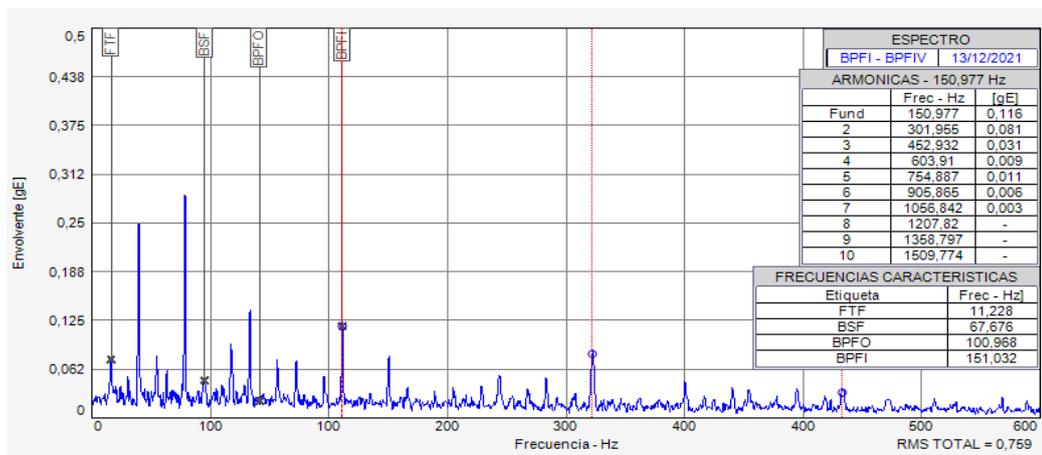


Figura 7: Espectro de envolvente, plano vertical, falla pista interna

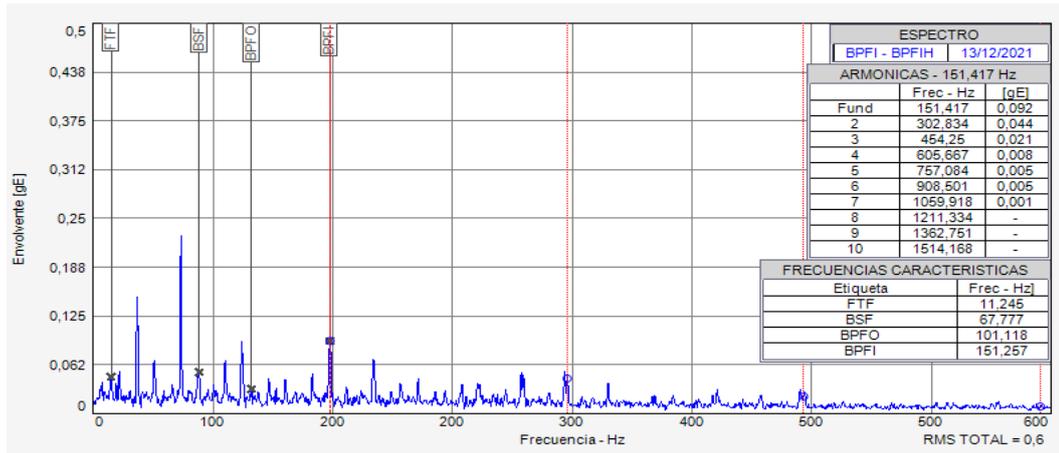


Figura 8: Espectro de envoltorio, plano horizontal, falla pista interna

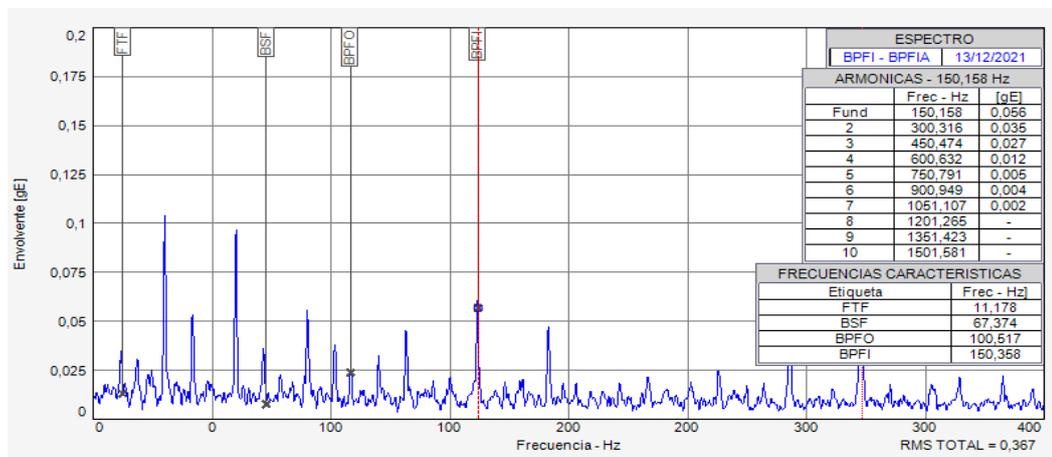


Figura 9: Espectro de envoltorio, plano axial, falla pista interna

7.4. Rodamiento con defecto en la pista externa e interna

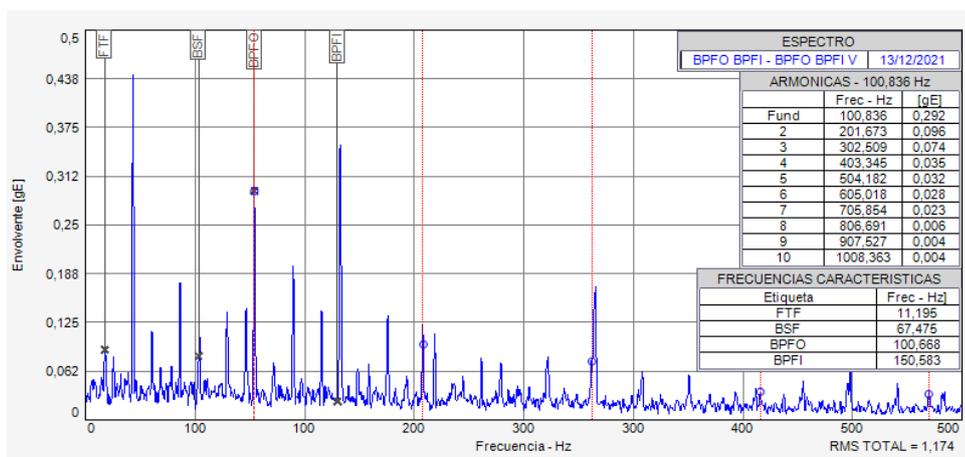


Figura 10: Espectro de envoltorio, plano vertical, falla pista externa e interna

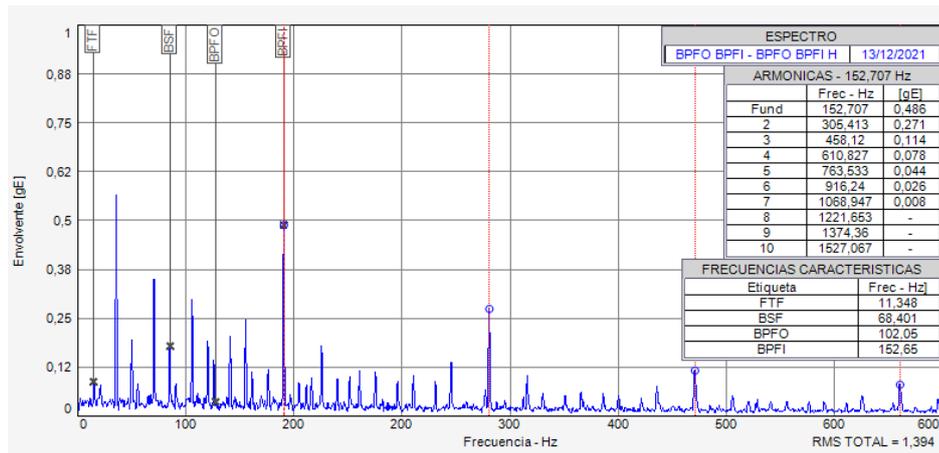


Figura 11: Espectro de envolvente, plano horizontal, falla pista externa e interna

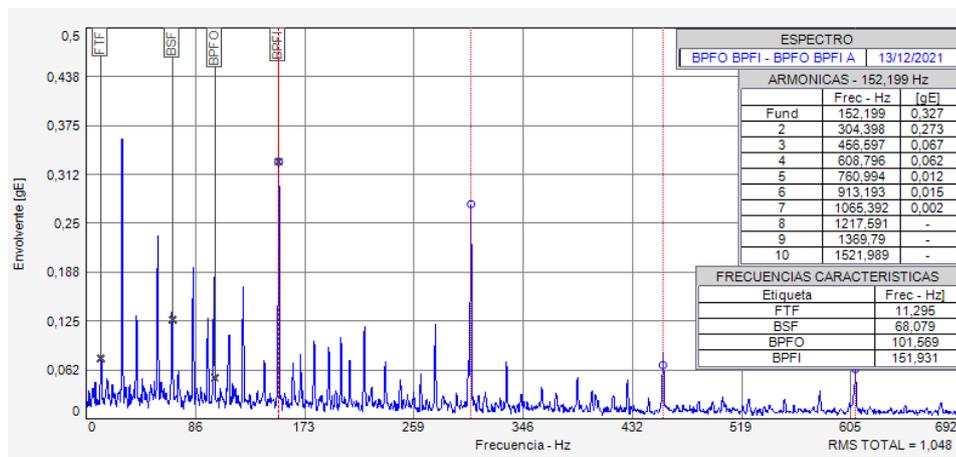


Figura 12: Espectro de envolvente, plano axial, falla pista externa e interna

8. TABULACIÓN DE RESULTADOS

El valor de amplitud de los armónicos de los espectros obtenidos anteriormente se debe tabular para cada rodamiento.

8.1. Rodamiento con falla en la pista interna

Tabla 1: Valores de amplitud, falla pista interna

Armónico \ Amplitud	Plano vertical (gE)	Plano horizontal (gE)	Plano axial (gE)
BPFO			
BPFI	0,116	0,092	0,06
BSF			
FTF			

8.2. Rodamiento con falla en la pista externa

Tabla 2: Valores de amplitud, falla pista externa

Armónico \ Amplitud	Plano vertical (gE)	Plano horizontal (gE)	Plano axial (gE)
BPFO	0,053	0,386	0,036
BPFI			
BSF			
FTF			

8.3. Rodamiento con falla en la pista externa e interna

Tabla 3: Valores de amplitud, con dos tipos de defectos

Armónico \ Amplitud	Plano vertical (gE)	Plano horizontal (gE)	Plano axial (gE)
BPFO	0,292	0,189	0,117
BPFI	0,351	0,486	0,364
BSF			
FTF			

9. GRÁFICOS E INTERPRETACIÓN

Para la comparación de los valores de amplitud de los armónicos se debe realizar gráficos comparativos de barras, para cada rodamiento.

9.1. Rodamiento con falla en la pista externa

Se realizó el siguiente gráfico que ayude a la interpretación y comparación de resultados obtenidos de las tablas realizadas anteriormente.

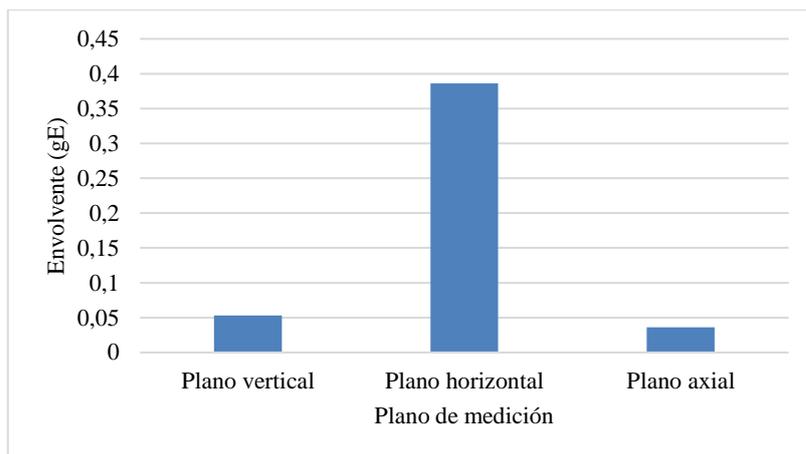


Gráfico 1: Comparación de la amplitud de la envolvente para el BPFO

Interpretación:

En la gráfica 1, el valor de amplitud de la envolvente en el plano horizontal es el más alto, con un valor de 0,386 gE. Mientras que las magnitudes en el plano vertical y axial son similares, la diferencia entre estas es de 0,017. El plano axial tiene el menor valor de amplitud.

9.2. Rodamiento con falla en la pista interna

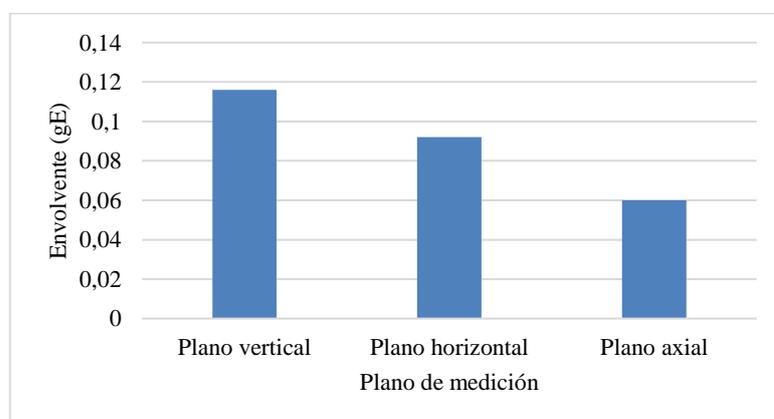


Gráfico 2: Comparación de la amplitud de la envolvente para el BPFI

Interpretación:

Mediante el gráfico 2, observamos como la amplitud de la envolvente en el plano vertical tiene un valor mayor en comparación a los demás planos de medición con un valor de 0,116 gE. El plano axial representa el menor valor de amplitud con un valor de 0,06 gE.

9.3. Rodamiento con falla en la pista externa e interna

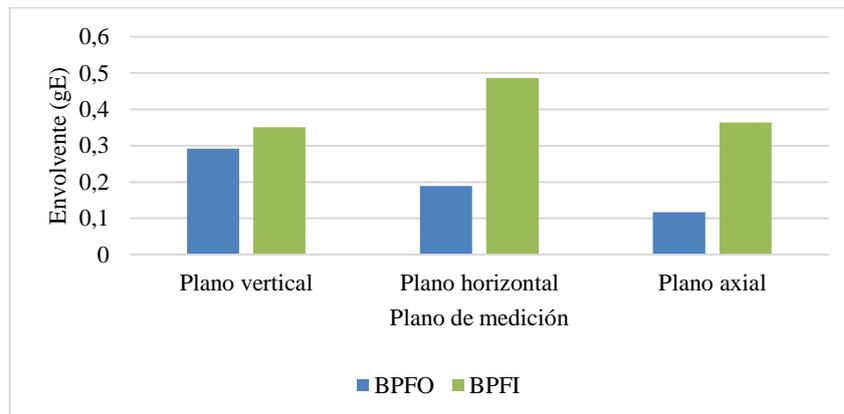


Gráfico 3: Comparación de la amplitud de la envolvente para el BPFO y BPFI

Interpretación:

En el gráfico 3 los valores más altos para la amplitud de la envolvente del BPFO y BPFI se encuentran en los planos vertical y horizontal respectivamente, con valores de 0,292 gE y 0,486 gE. En las amplitudes del BPFI, en el plano axial se midió la menor amplitud.

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

10.1. Conclusiones

Utilizando el gráfico 1, en donde se comparan las amplitudes de los armónicos generadas en el rodamiento con falla en la pista externa, se obtuvo que el punto de medición que refleja de mejor manera el defecto realizado es el horizontal, con un valor de 0,386 gE.

Al analizar la gráfica 2, el cual compara las amplitudes de los armónicos producidas por el defecto en la pista interna, se concluyó que el punto vertical indica de mejor manera la falla provocada en el rodamiento con una amplitud de envolvente de 0,116 gE.

Al analizar el gráfico 3, en donde se cotejan las amplitudes de los armónicos provocadas por los defectos en la pista externa e interna, se observó que para la detección del BPFO y BPFI el mejor punto de medición es el vertical para la detección del BPFO, y horizontal para el BPFI, con valores como 0,292 gE y 0,486 gE respectivamente.

En los gráficos 1, 2 y 3, en donde se compara la amplitud de los armónicos, se notó que en todos los casos el valor de la amplitud más pequeño se lo midió en el plano axial, lo que dificultaría la detección de fallos en esta dirección.

10.2. Recomendaciones

Inducir fallas en otros tipos de rodamientos para estudiar el comportamiento que tienen al someterlos a un trabajo continuo.

Adquirir un nuevo equipo de medición de vibraciones para agilizar el proceso de recolección de datos, ya que el laboratorio de diagnóstico técnico y eficiencia energética cuenta con solo uno de estos equipos.

Utilizar un método de diagnóstico adicional al empleado, como por ejemplo el método de diagnóstico de análisis de ultrasonido, para observar las diferencias y similitudes entre técnicas, como la facilidad para interpretar espectros, y la duración de la medición de vibraciones

11. OBSERVACIONES

¿El diagnóstico vibracional de fallas en rodamientos es esencial para la anticipación de fallos en máquinas rotatorias?

Respuesta: SI

¿Cuáles son los tipos de fallas en rodamientos?

Respuesta: Fallas en: pista externa, interna, jaula, y elemento rodante.

¿Qué frecuencia de falla se genera en un rodamiento con falla en la pista interna?

Respuesta: Frecuencia de falla BPFI.

¿Las frecuencias de fallo poseen armónicos que se reflejan en los espectros?

Respuesta: SI

En un rodamiento con defectos en diferentes zonas ¿Se reflejan más frecuencias de fallo?

Respuesta: SI

En la mayoría de mediciones ¿En qué planos de medición se obtuvieron los valores más altos de amplitud?

Respuesta: Vertical y horizontal.

A pesar de que los armónicos de falla se logran observar en el plano axial, ¿Es recomendable detectarlos en esta dirección?

Respuesta: No es recomendable.

ANEXO C: PLAN DE MANTENIMIENTO

Elaboración del plan de mantenimiento para el módulo de simulación

1. Descripción del módulo de simulación

El módulo de simulación cuenta con un motor eléctrico y varios elementos mecánicos, en los cuales se realizará el estudio, como se muestra en la ficha técnica del módulo de simulación.

2. Ficha técnica

	FICHA TÉCNICA DE DATOS Y CARACTERÍSTICAS	Código:	
		Versión	
		Fecha de elaboración:	
		Fecha de modificación:	
Elabora: Carlos Vergara/ Oscar Laura	Revisa: Ing. Eduardo Hernández	Aprueba: Ing. Eduardo Hernández	
Área: Laboratorio de diagnóstico técnico y eficiencia energética	Responsable del área: Ing. Eduardo Hernández		
Nombre del equipo: Módulo de simulación de fallas en rodamientos	Código de inventario: MFR		
Especificaciones técnicas			
Equipo	Descripción	Unidad	Valor
Motor eléctrico	Frecuencia	Hz	60
	Velocidad	rpm	1700
	Voltaje	V	220/380
	Intensidad	A	2,10/1,22
	Potencia	kW	0,37
	Torque nominal	Nm	4,2
Chumacera SKF SYK 20 TF	Diámetro interior	mm	20
	Capacidad de carga básica dinámica	kN	12,7
Rodamiento de prueba SKF 6208-2RS1	Diámetro interior	mm	20
	Diámetro exterior	mm	40
	Ancho	mm	18
	Capacidad de carga básica dinámica	kN	25,1
Observaciones:			

3. Despiece del equipo

Código	Sistema	Código	Equipo	Código	Componentes y elementos
MFR	Módulo de fallos en rodamientos	ETE	Tablero de control	MFR-ETE-01	Control
				MFR-ETE-02	Protección
		EME	Motor eléctrico	MFR-EME-01	Rotor
				MFR-EME-02	Estator
		BDP	Banco de pruebas	MFR-BDP-01	Eje de transmisión
				MFR-BDP-02	Chumacera SYK 20 TF
				MFR-BDP-03	Chumacera SYK 20 TF
				MFR-BDP-04	Acople de transmisión Lovejoy L-075
				MFR-BDP-05	Mecanismo de sujeción

4. Funcionamiento del módulo de simulación

El proceso de funcionamiento del módulo de simulación de fallas en rodamientos es de manera automática, puesto que contará con un tablero eléctrico que accionará el encendido de este.

Cuando se dé la señal de encendido, el motor trabajará a niveles normales de rpm, dejando en evidencia los fallos provocados en los rodamientos, esto se lo detectará mediante un análisis de vibraciones, para posteriormente proceder a la recolección de datos y después compararlos.

El montaje y desmontaje de rodamientos en buen estado y con defectos se lo realizará mediante un mecanismo de sujeción de rodamientos que tendrá el módulo de simulación, y facilitará el reemplazo de estos.

5. Contexto operacional

Aspectos climáticos	El equipo se encuentra en el laboratorio de diagnóstico bajo protección de cubierta. El laboratorio cuenta con una temperatura ambiente de 16 a 18° C.
Normas reglamentos	Para la utilización del módulo de simulación dentro del laboratorio de diagnóstico técnico y eficiencia energética de la ESPOCH se dispone de un reglamento interno el cual nos dice que los estudiantes deben utilizar: Mandil y guantes de cuero.
Proceso	El módulo de simulación cuenta con equipos y elementos cuya función es la simulación de fallos en rodamientos, se generará movimiento de rotación de los rodamientos, y producirá un espectro de vibración propio de la falla simulada, que ayudará al diagnóstico de las mismas.
Límites de uso	El módulo de simulación cuenta con un límite de uso, esto sucede cuando el motor llega a 1700 rpm, considerando que el motor no puede superar dichas revoluciones, a más de que el uso del mismo será hasta obtener los datos.

6. Tareas de mantenimiento en modo calendario

Modo calendario	
Diario	D
Semanal	S
Quincenal	Q
Mensual	M
Trimestral	T
Semestral	SM

7. Asignación de tareas de mantenimiento

Equipo	Componente/Elemento	Código	Tarea de mantenimiento preventivo	Frecuencia	Materiales y repuestos		
				Modo calendario	Materiales	Cantidad	Unidad
Motor eléctrico	Estator	MFR-EME-02	Análisis vibracional del motor eléctrico	SM			
Banco de pruebas	Chumacera SYK 20 TF	MFR-BDP-02	Inspección visual de la chumacera 01	T			
			Aplicación periódica de grasa en la chumacera 01	SM	Lubricante SKF LGFP 2	420	MI
	Chumacera SYK 20 TF	MFR-BDP-03	Inspección visual de la chumacera 02	T			
			Aplicación periódica de grasa en la chumacera 02	SM	Lubricante SKF LGFP 2	420	MI
Tablero eléctrico	Control	MFR-ETE-01	Barrido termográfico de las conexiones de los elementos de control	SM			
	Protección	MFR-ETE-02	Barrido termográfico de las conexiones de los elementos de protección	SM			

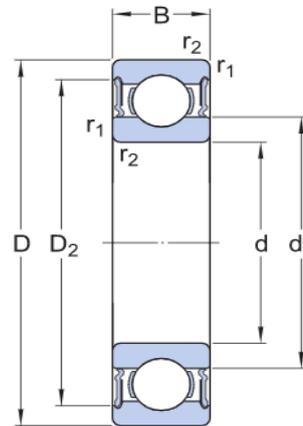
ANEXO D: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL RODAMIENTO 6208-2RS1



Figura 1: Rodamiento rígido de bolas 6208-2RS1.

Tabla 30-3: Especificaciones técnicas del rodamiento 6208-2RS1

Dimensiones	
Diámetro del agujero (d)	40 mm
Diámetro exterior (D)	80 mm
Ancho (B)	18 mm
Diámetro del resalte del aro interior (d_1)	52,6 mm
Diámetro del rebaje del aro exterior (D_2)	69,8 mm
Datos del cálculo	
Capacidad de carga dinámica básica (C)	32,5 kN
Capacidad de carga dinámica básica (C_0)	19 kN
Carga límite de fatiga (P_u)	0,8 kN
Velocidad límite	5600 r/min
Factor de cálculo (f_0)	13,8
Factor de cálculo (k_r)	0,025
Rodamiento de masa	0,38 kg



ANEXO E: ANÁLISIS ESTÁTICO DEL RODAMIENTO 6208-2RS1

Utilizando el software SolidWorks Académico, se realizó un análisis estático aplicando una fuerza a la pista interna del rodamiento de 75 kgf. Obteniéndose los siguientes resultados:

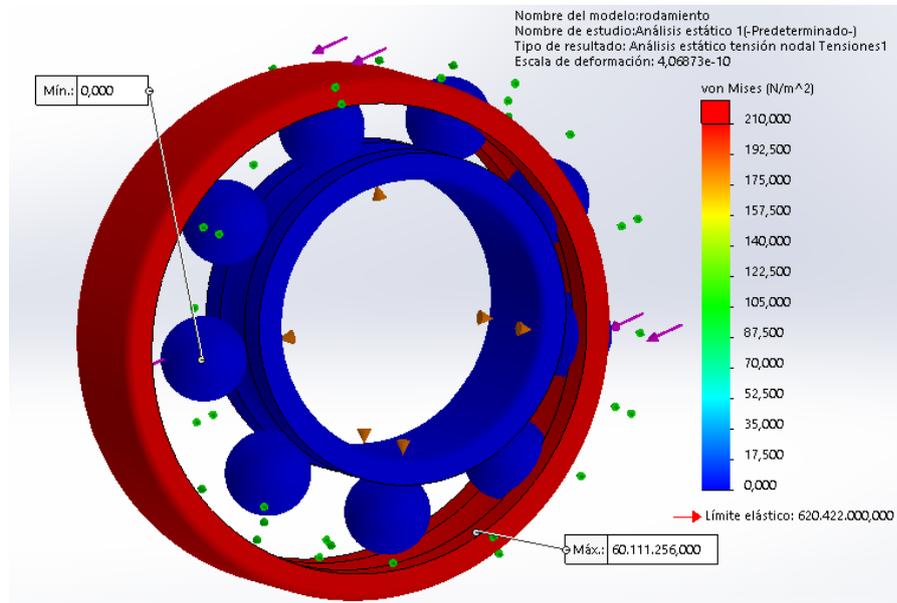


Figura 1: Gráfica de tensiones.

Tabla 1: Esfuerzos de la simulación

Esfuerzo	Presión (MPa)
Esfuerzo máximo	60,11
Esfuerzo mínimo	0
Límite elástico	206,807

Factor de seguridad:

Se obtuvo un factor de seguridad de 10, al aplicar una fuerza de 75 kgf. Lo que está acorde con las diferentes fuentes bibliográficas revisadas, estas recomiendan siempre un factor de seguridad mayor a 1. Esto se puede usar como referencia si se quiera aplicar una fuerza al momento de realizar los ensayos en el módulo de simulación de fallos en rodamientos.

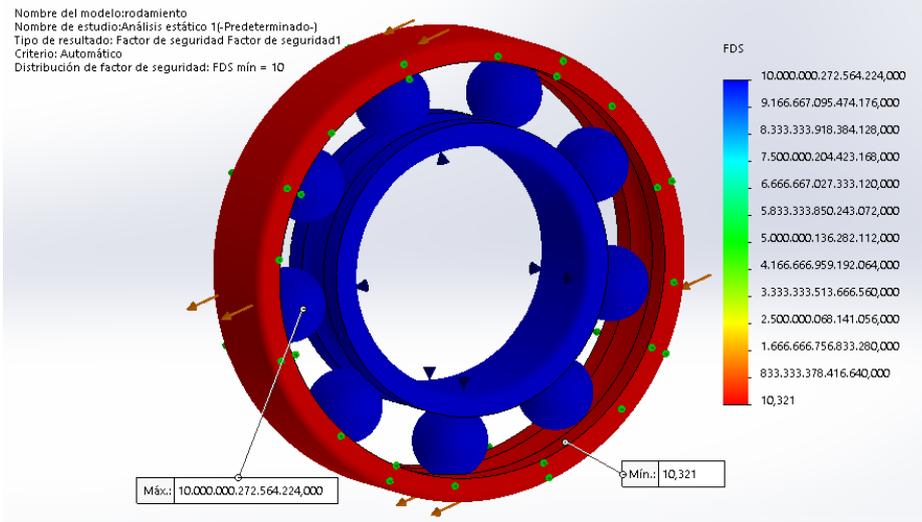


Figura 2: Factor de seguridad obtenido en la simulación.

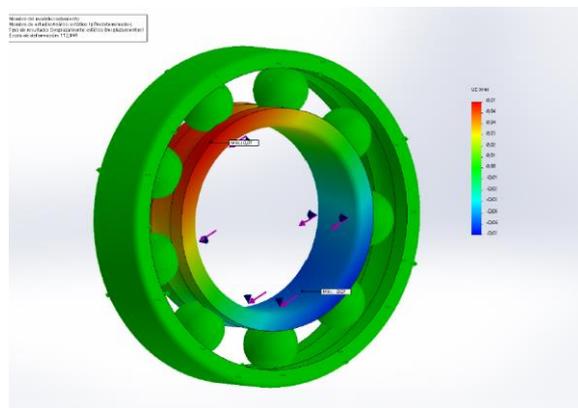


Figura 3: Gráfica de desplazamientos.

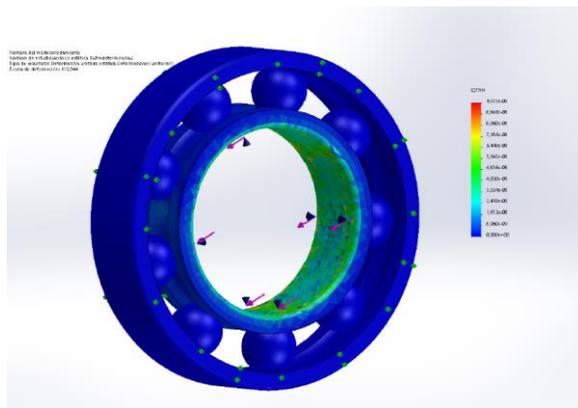


Figura 4: Gráfica de deformaciones unitarias.

ANEXO F: MEDICIONES ADICIONALES

Espectros obtenidos del módulo 2:

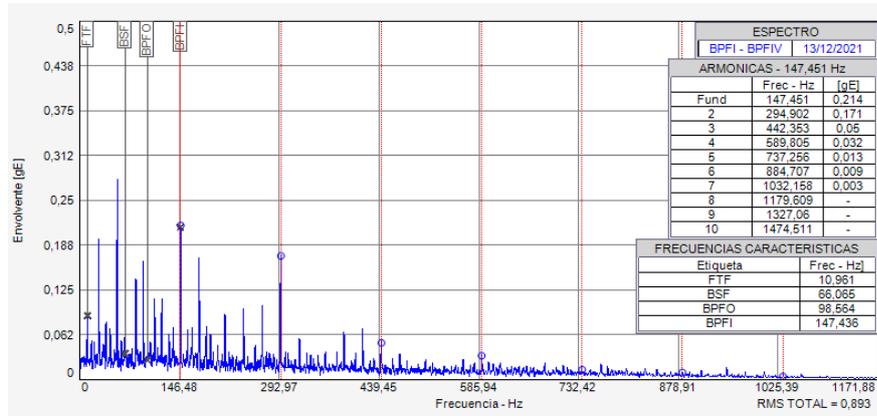


Figura 1: Medición del BPF1, en el módulo 2.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

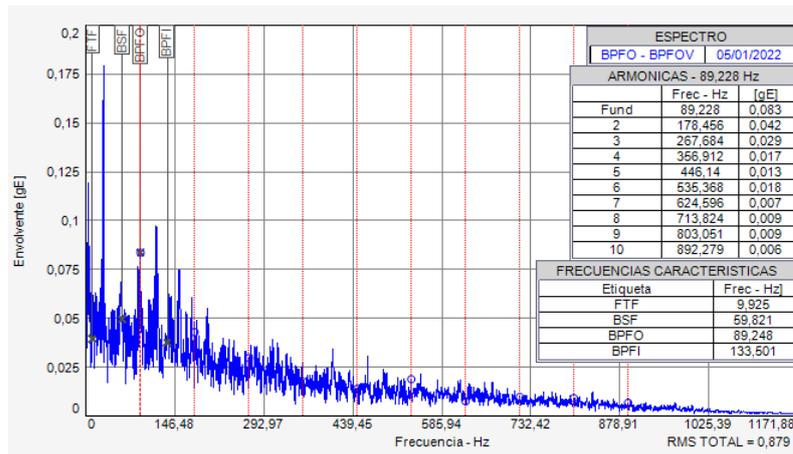


Figura 2: Medición del BPFO, en el módulo 2.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

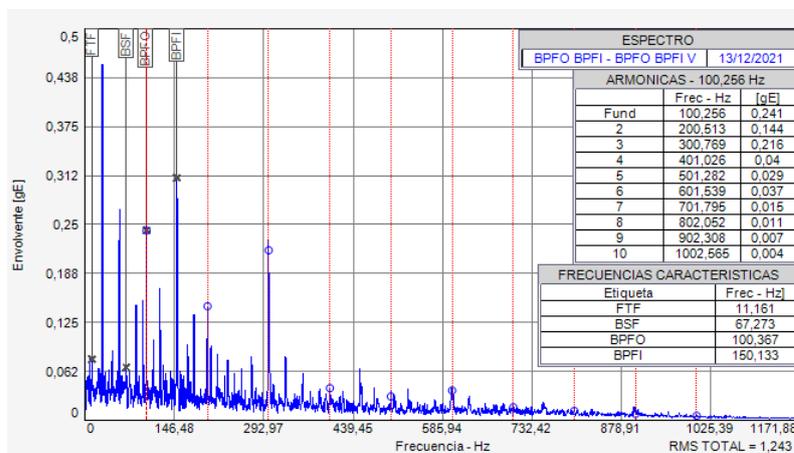


Figura 3: Medición del BPFO y BPF1, en el módulo 2.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

Espectros obtenidos del módulo 3:

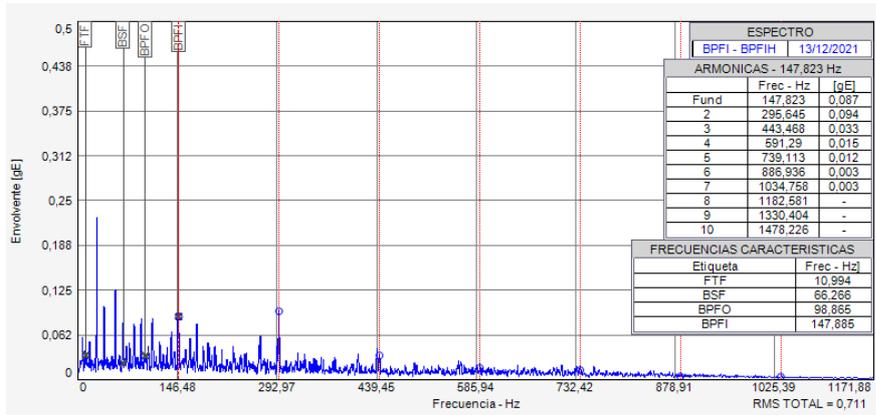


Figura 4: Medición del BPFH, en el módulo 3.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

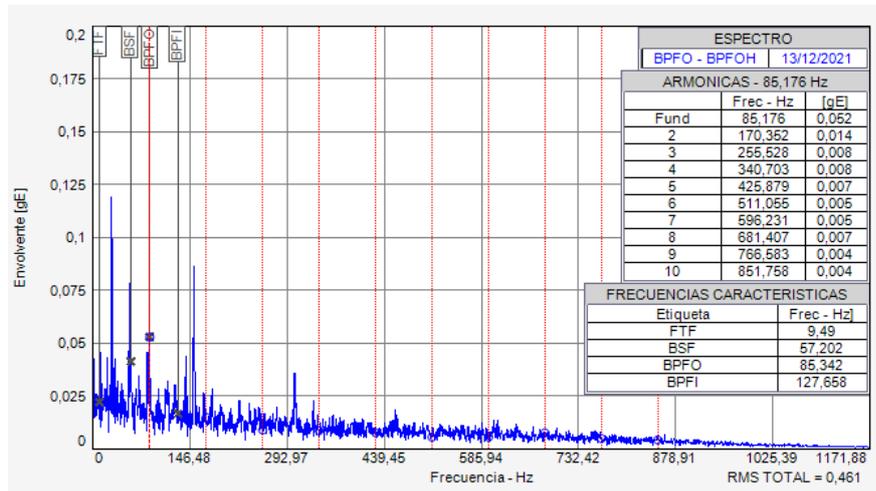


Figura 5: Medición del BPFO, en el módulo 3.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

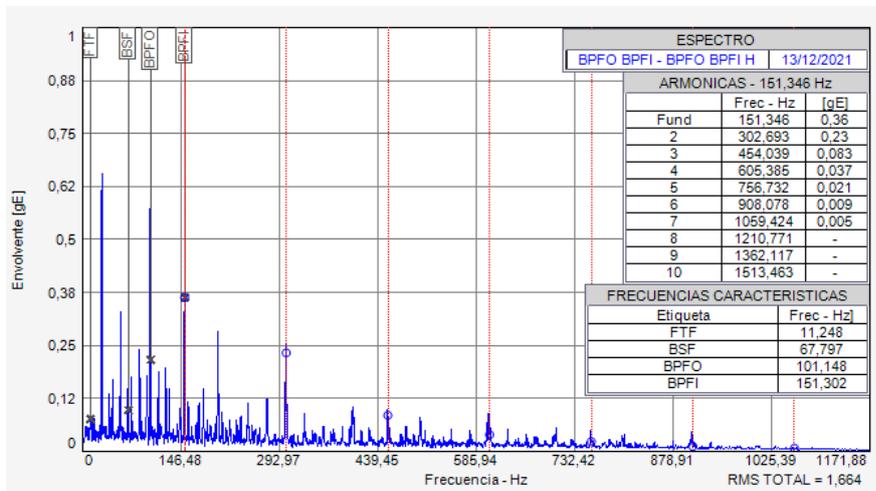


Figura 6: Medición del BPFO y BPFH, en el módulo 3.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

Espectros obtenidos del módulo 4:

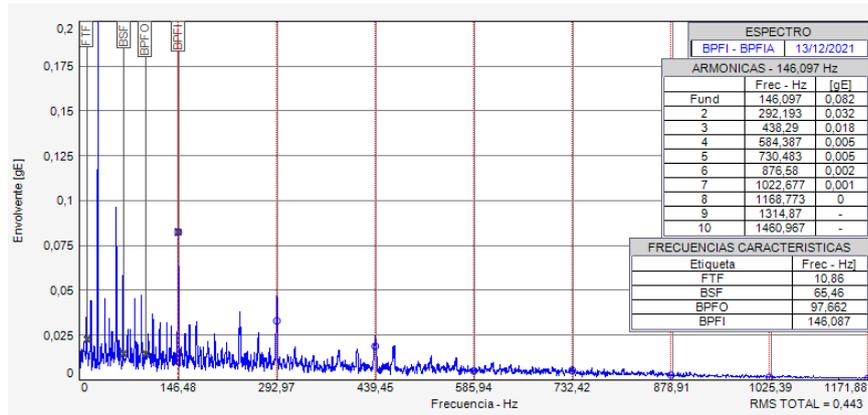


Figura 7: Medición del BPF1, en el módulo 4.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

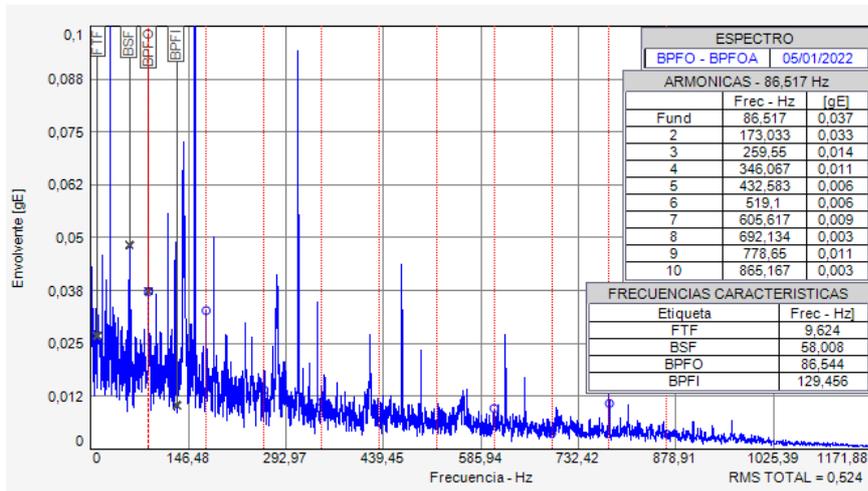


Figura 8: Medición del BPFO, en el módulo 4.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

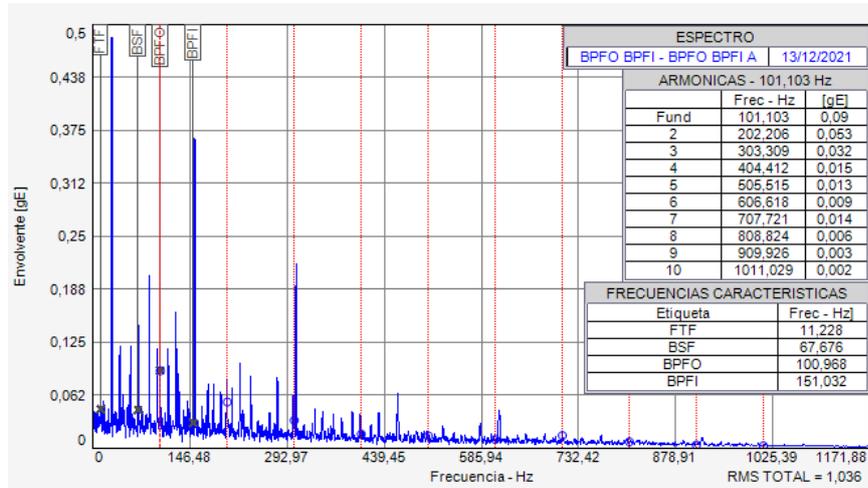


Figura 9: Medición del BPFO y BPF1, en el módulo 4.
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

Comparación de valores de frecuencias de fallo de los módulos

Tabulación de la amplitud del BPFI:

Tabla 1: Amplitud del BPFI para todos los módulos

Módulo \ Armónico	BPFI (gE)
Módulo 1	0,116
Módulo 2	0,214
Módulo 3	0,087
Módulo 4	0,082

Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

Tabulación del BPFO:

Tabla 2: Amplitud del BPFO para todos los módulos

Módulo \ Armónico	BPFO (gE)
Módulo 1	0,386
Módulo 2	0,083
Módulo 3	0,052
Módulo 4	0,037

Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

Tabulación del BPFO y BPFI:

Tabla 3: Amplitud del BPFO y BPFI para todos los módulos

Módulo \ Armónico	BPFI (gE)	BPFO (gE)
Módulo 1	0,292	0,486
Módulo 2	0,241	0,308
Módulo 3	0,36	0,24
Módulo 4	0,181	0,327

Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

Los valores de BPFI medidos en los módulos no existe mayor diferencia, y en donde se registró la mayor amplitud fue en el módulo 2. De igual manera en el BPFO la mayor amplitud se obtuvo en el módulo 1. En la detección del BPFO y BPFI la amplitud no es muy inestable.

Formas de onda de desplazamiento de los módulos de simulación:

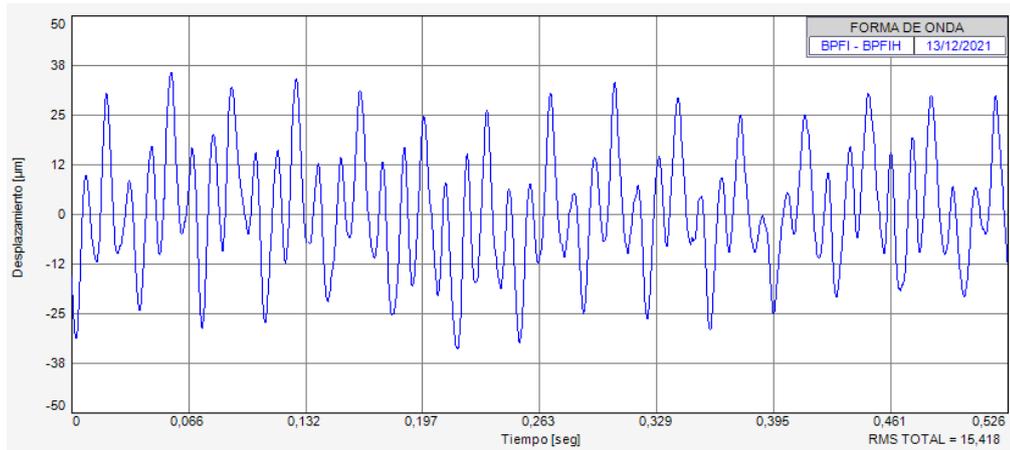


Figura 10: Forma de onda del módulo uno, plano horizontal
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

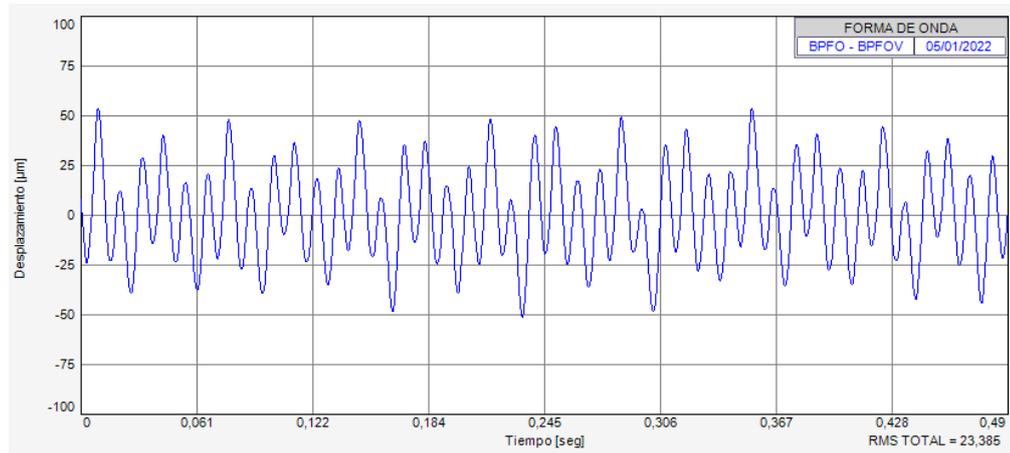


Figura 11: Forma de onda del módulo dos, plano vertical
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

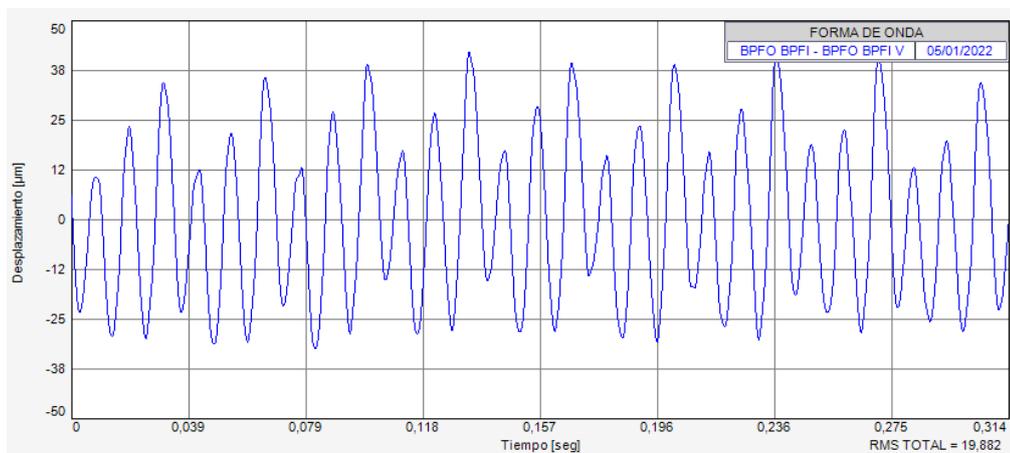


Figura 12: Forma de onda del módulo tres, plano vertical
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

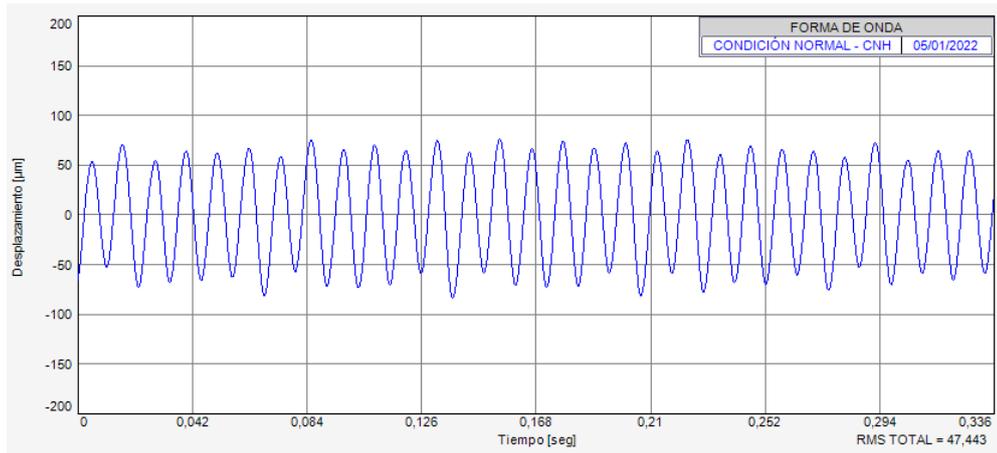


Figura 13: Forma de onda del módulo 4, plano horizontal
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

La forma de onda de las figuras 10, 11 y 12 muestran una sinusoide asimétrica, esto se debe a que estas fueron medidas con rodamientos con defectos. Mientras que la forma de onda de la figura 13 muestra una sinusoide más simétrica porque fue medida mientras se realizaba un rodamiento en condición normal.

Frecuencias naturales adicionales:

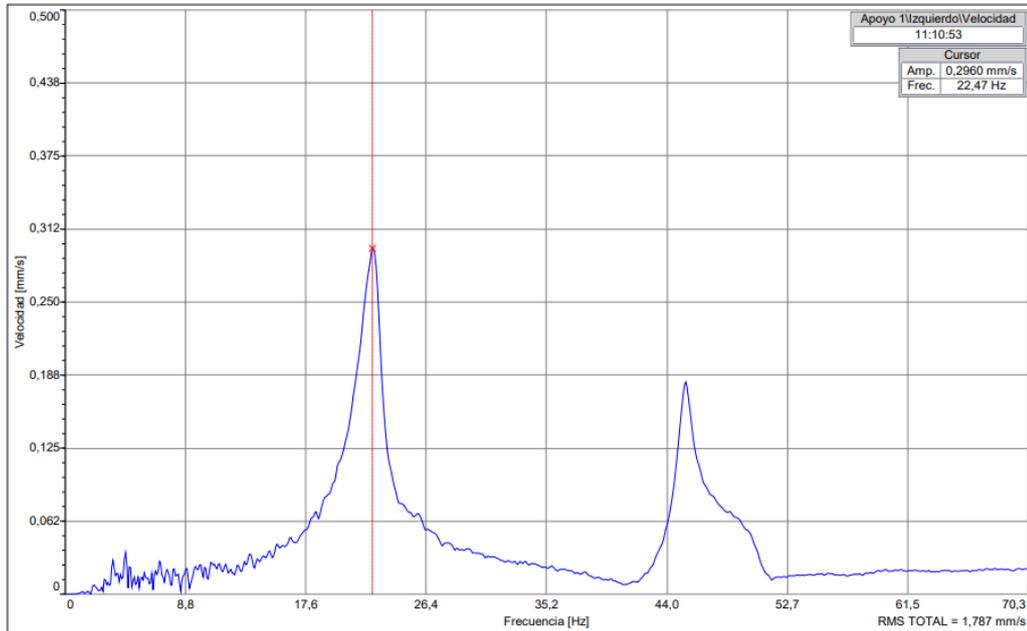


Figura 14: Frecuencia fundamental del módulo 2
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

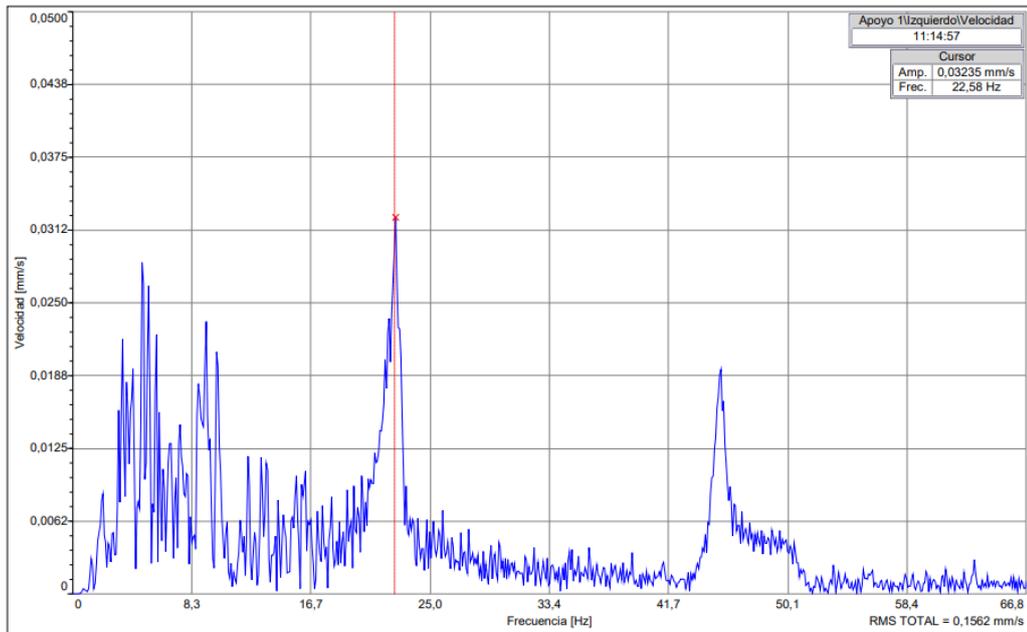


Figura 15: Frecuencia fundamental del módulo 3
Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

Tabulación de las frecuencias naturales de los módulos de simulación:

Tabla 4: Frecuencias naturales de los módulos de simulación

Módulo	Dirección de medición	Frecuencia (Hz)
Módulo 1	Vertical	24,4
	Horizontal	26
	Axial	18,1
Módulo 2	Vertical	22,47
	Horizontal	22,58
Módulo 3	Vertical	32,9
	Horizontal	33
Módulo 4	Vertical	32,5
	Horizontal	33

Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

Tabulación de las amplitudes del apartado 3.5.4.5.

Rodamiento con falla en la pista interna:

Tabla 5: Mediciones de amplitud, falla en la pista interna

Armónico \ Amplitud	Plano vertical (gE)	Plano horizontal (gE)	Plano axial (gE)
BPFO			
BPFI	0,116	0,092	0,06
BSF			
FTF			

Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

Rodamiento con falla en la pista externa:

Tabla 6: Mediciones de amplitud, falla en la pista externa

Armónico \ Amplitud	Plano vertical (gE)	Plano horizontal (gE)	Plano axial (gE)
BPFO	0,053	0,386	0,036
BPFI			
BSF			
FTF			

Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

Rodamiento con falla en la pista externa e interna:

Tabla 7: Mediciones de amplitud, falla en la pista externa e interna

Armónico \ Amplitud	Plano vertical (gE)	Plano horizontal (gE)	Plano axial (gE)
BPFO	0,292	0,189	0,117
BPFI	0,351	0,486	0,364
BSF			
FTF			

Realizado por: Laura, O.; Vergara, C. 2022

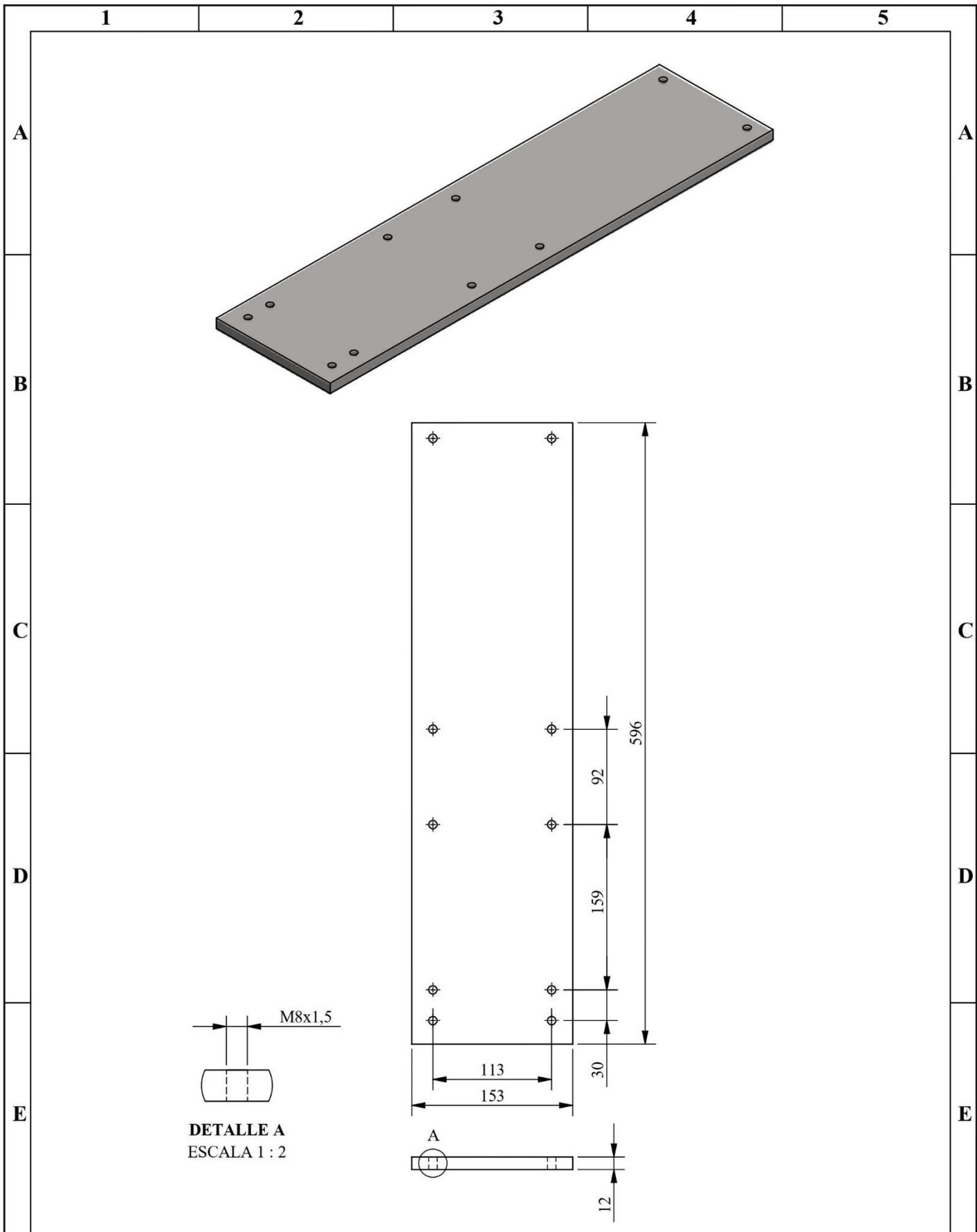
ANEXO G: ANÁLISIS ECONÓMICO

Los materiales y equipos usados para la construcción del módulo de simulación de fallas en rodamientos, se encuentran con facilidad en el mercado local y el costo que representan para la fabricación entran en lo límites económicos que tiene una mediana empresa para poder invertir en el diagnóstico vibracional de fallos en rodamientos. Para un conocimiento más detallado del costo de los materiales y equipos necesarios para la fabricación del módulo de simulación, se muestra la siguiente tabla:

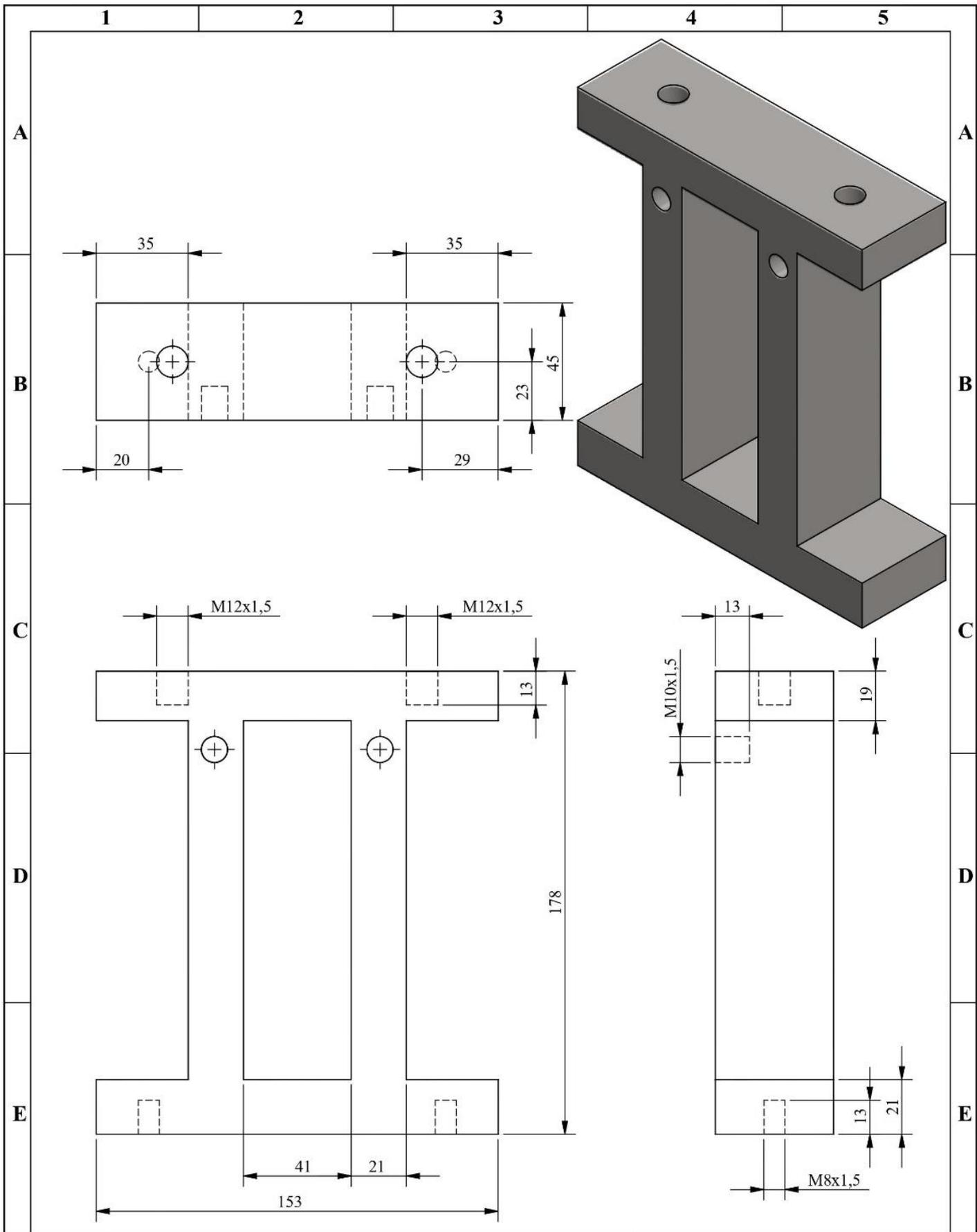
Material/Equipo	Valor (USD)
Acero AISI 1020, para las bases de los módulos	121,54
Pernos M10x1,5	30,40
1 galón de pintura y 2 litros de thinner	27,00
Placas redondas para las patas de las mesas	20,35
Placas y tubos cuadrados para las mesas	478,28
Tuercas M10	4,80
Motores WEG W22	1023,31
Chumaceras SYK 20 TF	36,00
Cauchos para las patas de la mesa	48,00
Acero AISI 1020, para las piezas de los módulos	629,89
Acero AISI 1144, para la construcción de ejes	34,93
Machuelos M8	6,75
Pernos M8x1,5	43,24
Prisioneros M4x1,5	18,70
Acoples LoveJoy L075	218,04
Pernos avellanados	6,40
Rodamientos 6208	29,00
Arandelas	2,99
TOTAL	2779,62

El costo total que se muestra en la anterior tabla es para la construcción de cuatro módulos de simulación de fallas en rodamientos y sus cuatro mesas de apoyo.

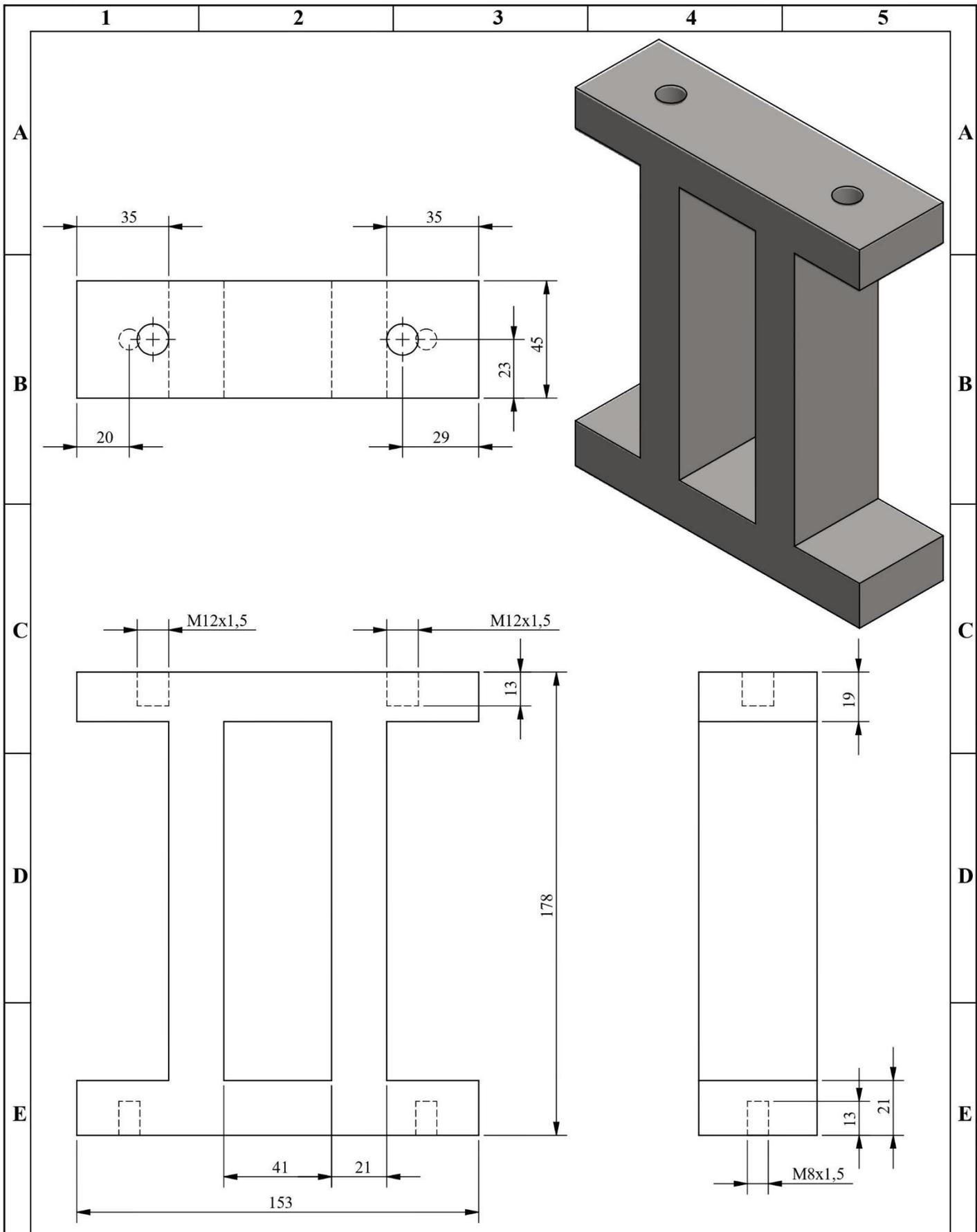
ANEXO H: PLANOS



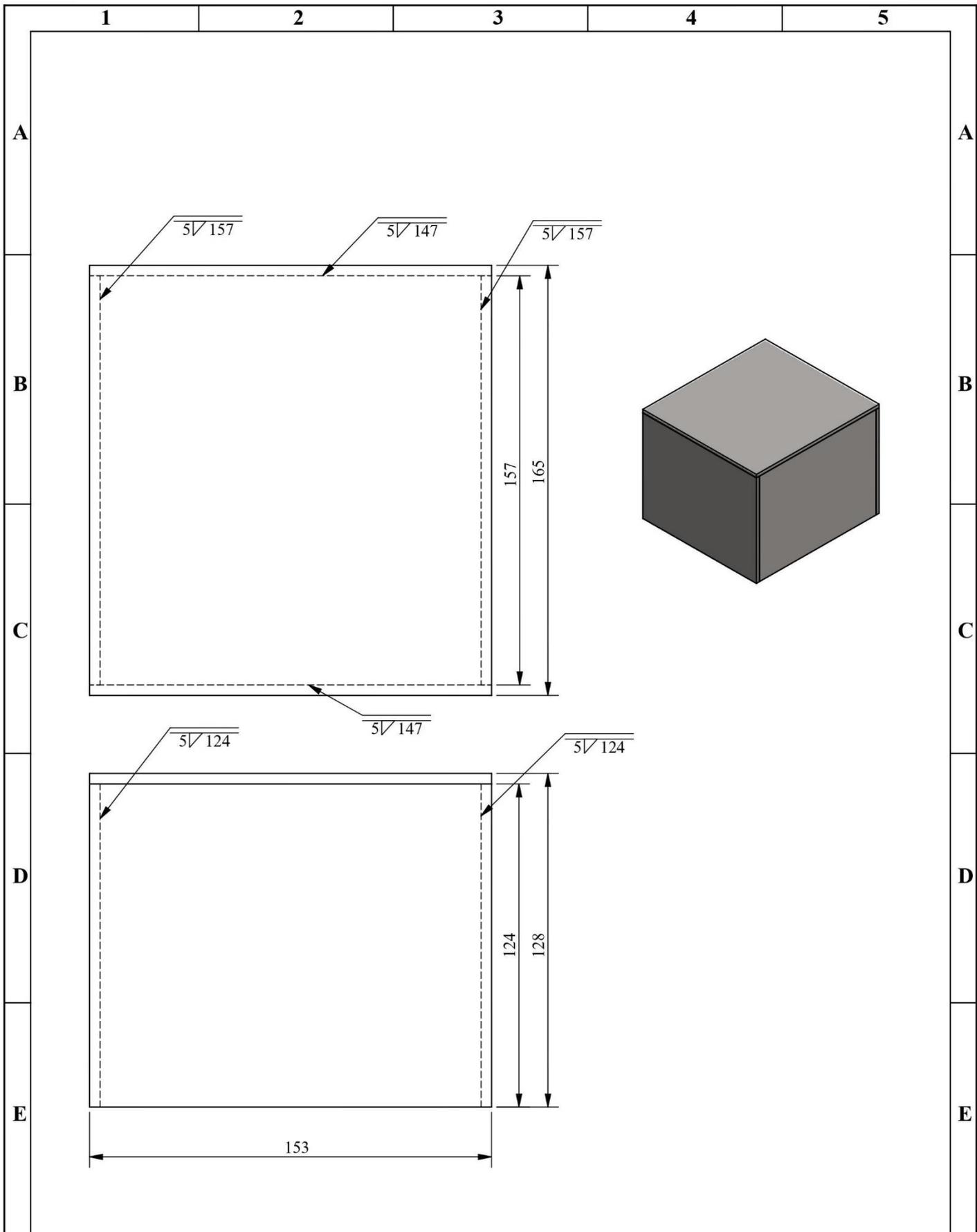
Nº. Lámina: 1 de 18		Nº. Hojas: 18		Sustitución:		Codificación: MFR-BM		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA INGENIERÍA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL			
Email: oscar.laura@epoch.edu.ec Teléfonos: 0981193586						Denominación: BASE DEL MÓDULO DE SIMULACIÓN					
Datos	Nombre	Firma	Fecha	Materiales: AISI 1020 Nombre de archivo: BASE DEL MÓDULO.sldprt				8,60	±0,3 [mm]	1:5	
Proyectó	Vergara C.		2022/02/24								
Dibujó	Laura O.		2022/02/24								
Revisó	Ing. Naranjo E.		2022/02/24								
Aprobó	Ing. Naranjo E.		2022/02/24								



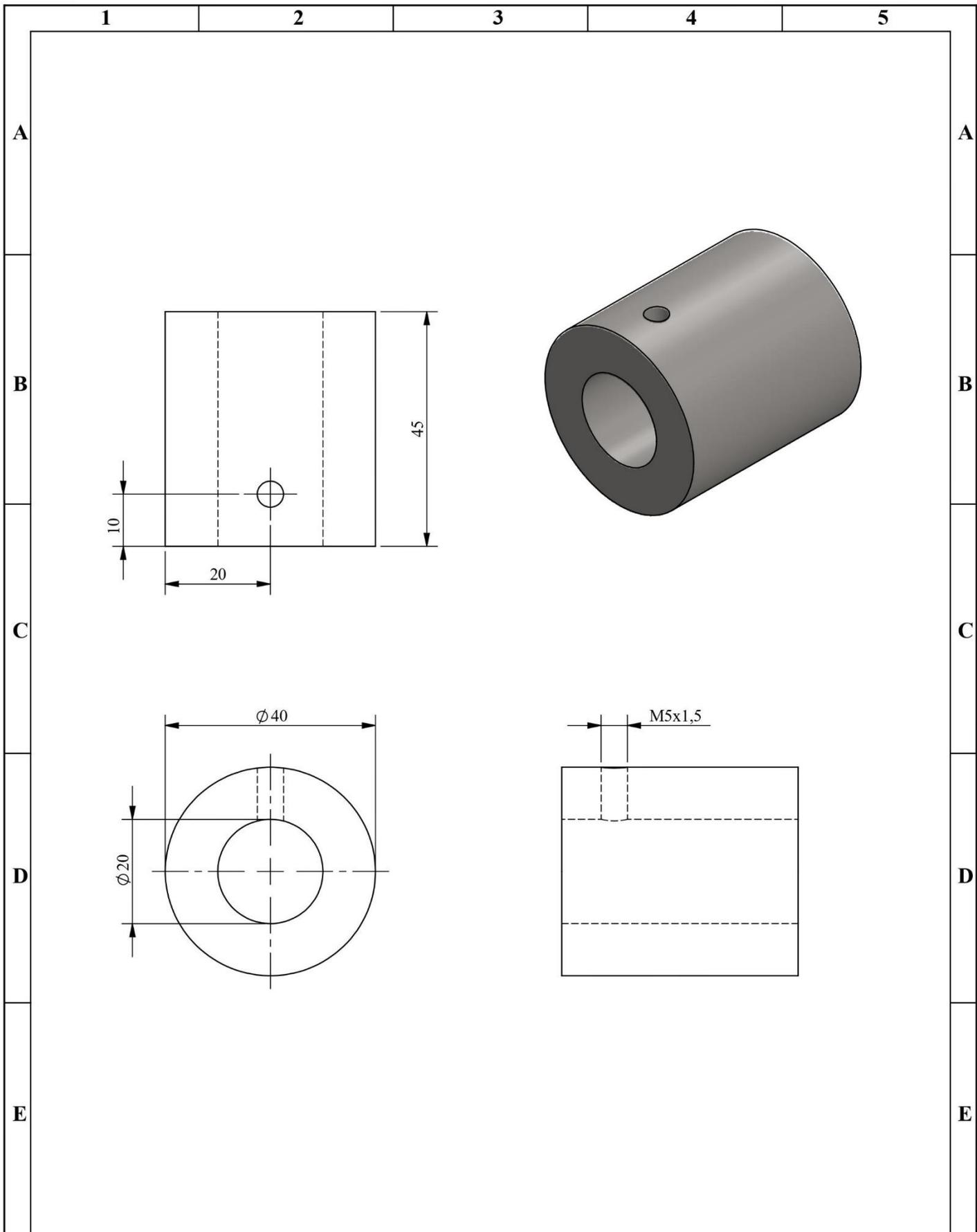
Nº. Lámina: 2 de 18		Nº. Hojas: 18		Sustitución:		Codificación: MFR-BCH01		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA INGENIERÍA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL			
Email: oscar.laura@epoch.edu.ec Teléfonos: 0981193586						Denominación: BASE DE LA CHUMACERA 01					
Datos	Nombre	Firma	Fecha	Materiales: AISI 1020		Nombre de archivo: BASE CHUMACERA 01.sldprt		4,29	±0,3 [mm]	1:2	
Proyectó	Vergara C.		2022/02/24								
Dibujó	Laura O.		2022/02/24								
Revisó	Ing. Naranjo E.		2022/02/24								
Aprobó	Ing. Naranjo E.		2022/02/24								



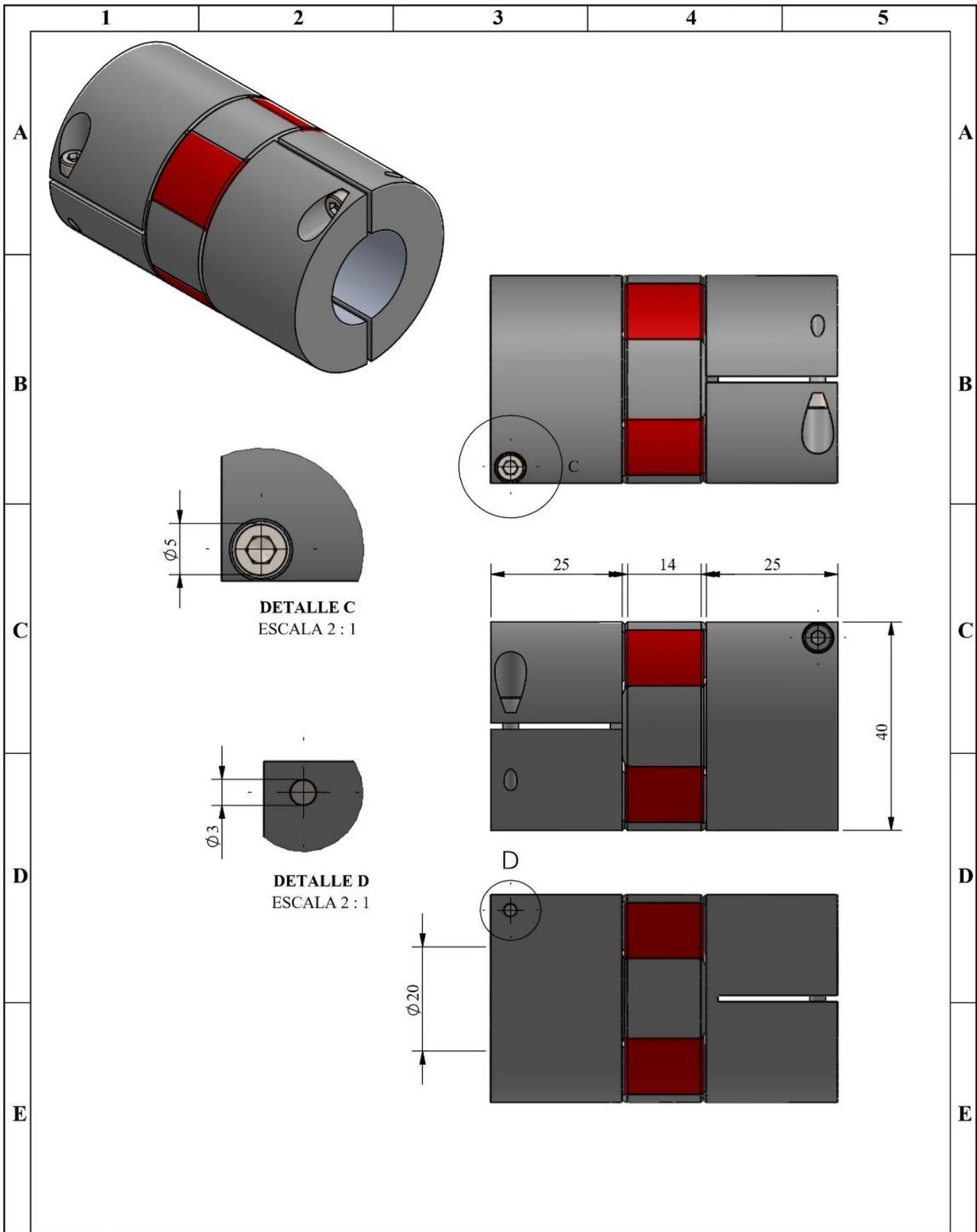
Nº. Lámina: 3 de 18		Nº. Hojas: 18		Sustitución:		Codificación: MFR-BCH02		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA INGENIERÍA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL							
Email: oscar.laura@epoch.edu.ec Teléfonos: 0981193586						Denominación: BASE DE LA CHUMACERA 02						Peso [Kg]		Tolerancia	
Datos		Nombre		Firma		Fecha		4,30		±0,3 [mm]		1:5			
Proyectó		Vergara C.				2022/02/24		Materiales: AISI 1020							
Dibujó		Laura O.				2022/02/24									
Revisó		Ing. Naranjo E.				2022/02/24									
Aprobó		Ing. Naranjo E.				2022/02/24		Nombre de archivo: BASE CHUMACERA 02.sldprt							



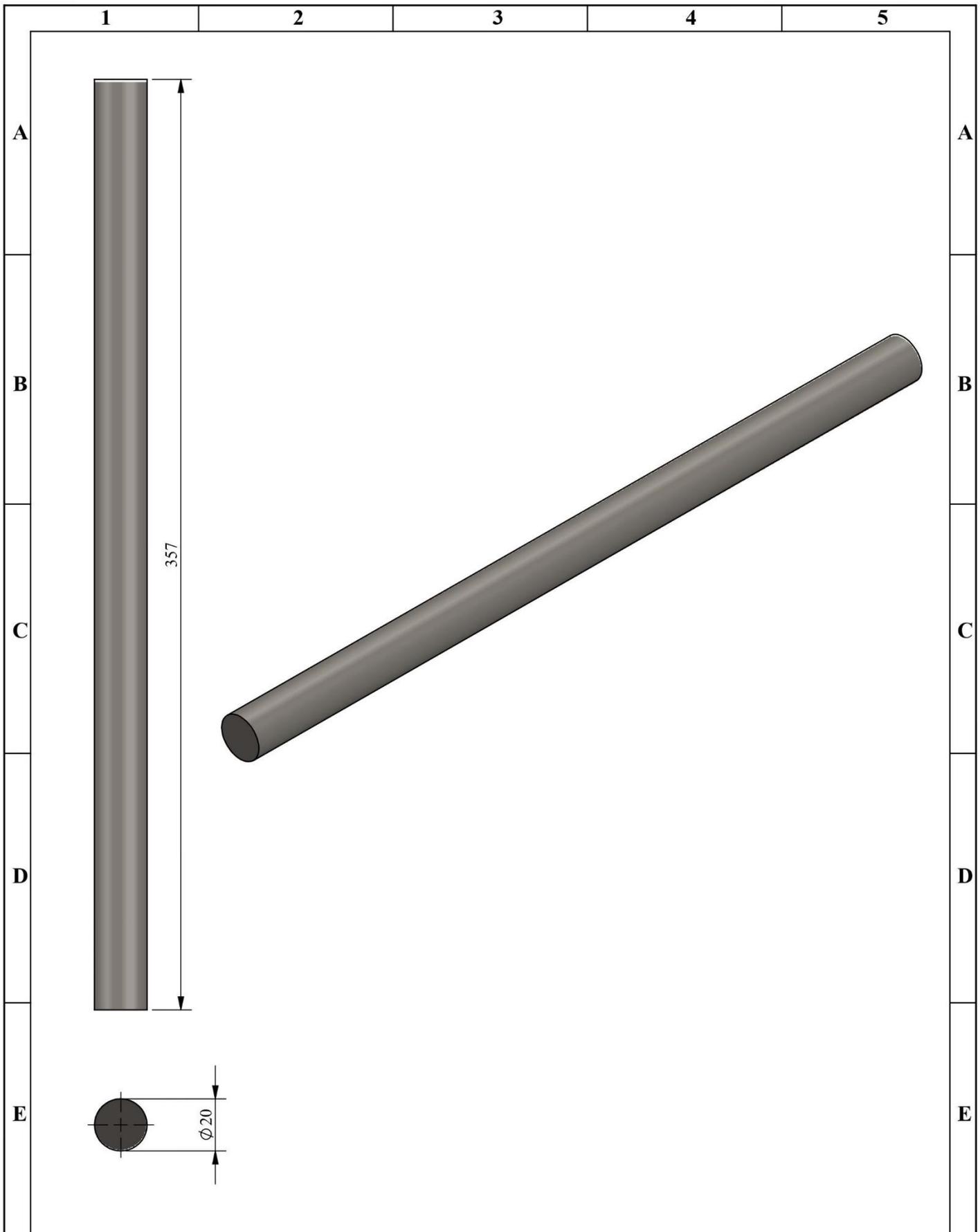
Nº. Lámina: 4 de 18		Nº. Hojas: 18		Sustitución:		Codificación: MFR-BM		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA INGENIERÍA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL			
Email: oscar.laura@epoch.edu.ec Teléfonos: 0981193586						Denominación: BASE DEL MOTOR					
Datos	Nombre	Firma	Fecha	Materiales: AISI 1020		Nombre de archivo: BASE MOTOR.sldprt		3,23	±0,3 [mm]	1:2	
Proyectó	Vergara C.		2022/02/24								
Dibujó	Laura O.		2022/02/24								
Revisó	Ing. Naranjo E.		2022/02/24								
Aprobó	Ing. Naranjo E.		2022/02/24								



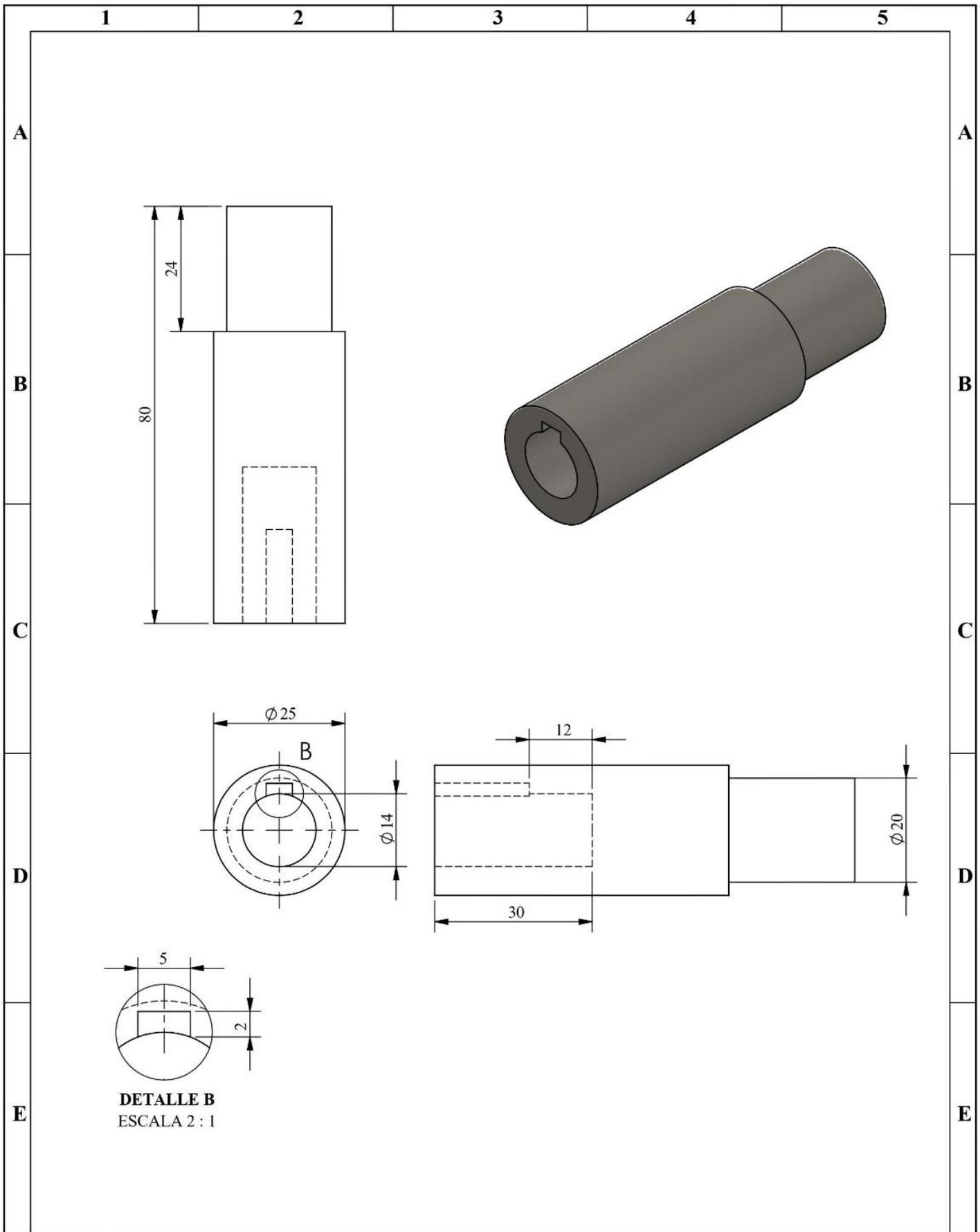
Nº. Lámina: 5 de 18		Nº. Hojas: 18		Sustitución:		Codificación: MFR-BN		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA INGENIERÍA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL							
Email: oscar.laura@epoch.edu.ec Teléfonos: 0981193586						Denominación: BOCÍN						Peso [Kg]		Tolerancia	
Datos		Nombre		Firma		Fecha		0,33		±0,3 [mm]		1:1			
Proyectó		Vergara C.				2022/02/24		Materiales: AISI 1020							
Dibujó		Laura O.				2022/02/24									
Revisó		Ing. Naranjo E.				2022/02/24									
Aprobó		Ing. Naranjo E.				2022/02/24		Nombre de archivo: BOCIN.sldprt							



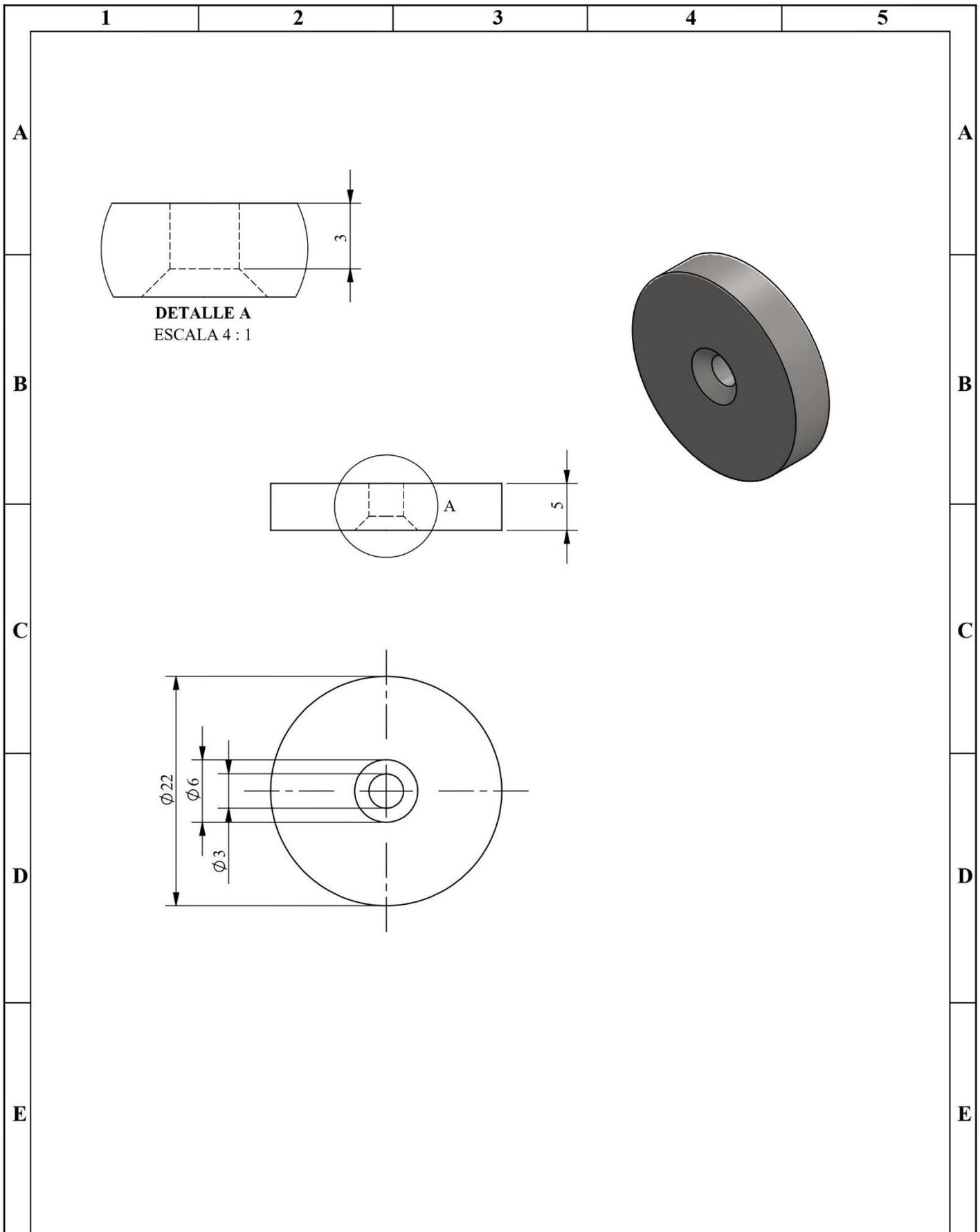
Nº. Lámina: 6 de 18		Nº. Hojas: 18		Sustitución:		Codificación: MFR-AC		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA INGENIERÍA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL							
Email: oscar.laura@epoch.edu.ec Teléfonos: 0981193586						Denominación: ACOPLE						Peso [Kg]		Tolerancia	
Datos	Nombre	Firma	Fecha	Materiales: Hierro		Nombre de archivo: ACOPLE.sldprt		0,17		±0,3 [mm]		1:1			
Proyectó	Vergara C.		2022/02/24												
Dibujó	Laura O.		2022/02/24												
Revisó	Ing. Naranjo E.		2022/02/24												
Aprobó	Ing. Naranjo E.		2022/02/24												



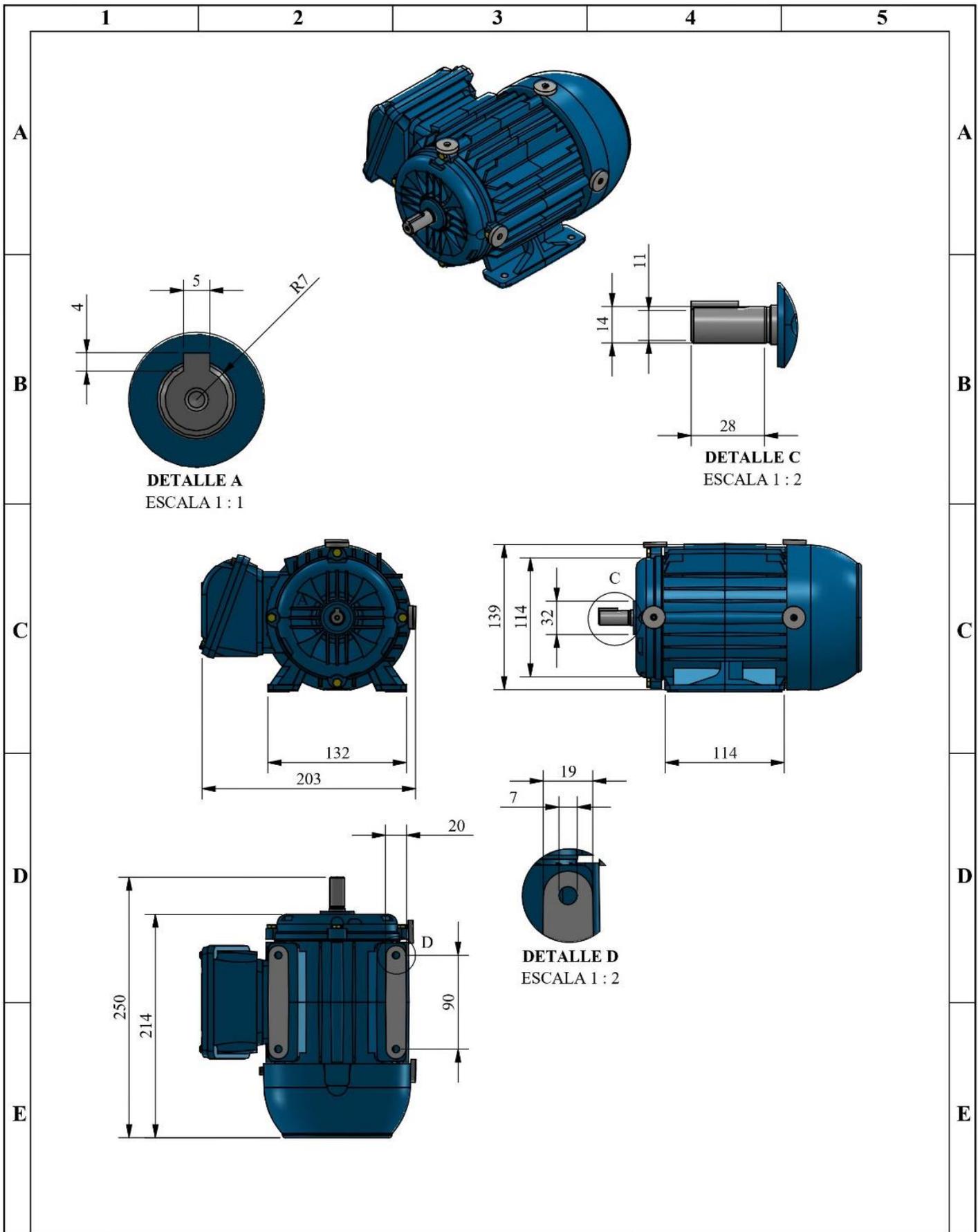
N°. Lámina: 7 de 18		N°. Hojas: 18		Sustitución:		Codificación: MFR-EP		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA INGENIERÍA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL							
Email: oscar.laura@epoch.edu.ec Teléfonos: 0981193586						Denominación: EJE PRINCIPAL						Peso [Kg]		Tolerancia	
Datos		Nombre		Firma		Fecha		0,90		±0,3 [mm]		1:2			
Proyectó		Vergara C.				2022/02/24		Materiales: AISI 1144							
Dibujó		Laura O.				2022/02/24									
Revisó		Ing. Naranjo E.				2022/02/24		Nombre de archivo: EJE PRINCIPAL.sldprt							
Aprobó		Ing. Naranjo E.				2022/02/24									



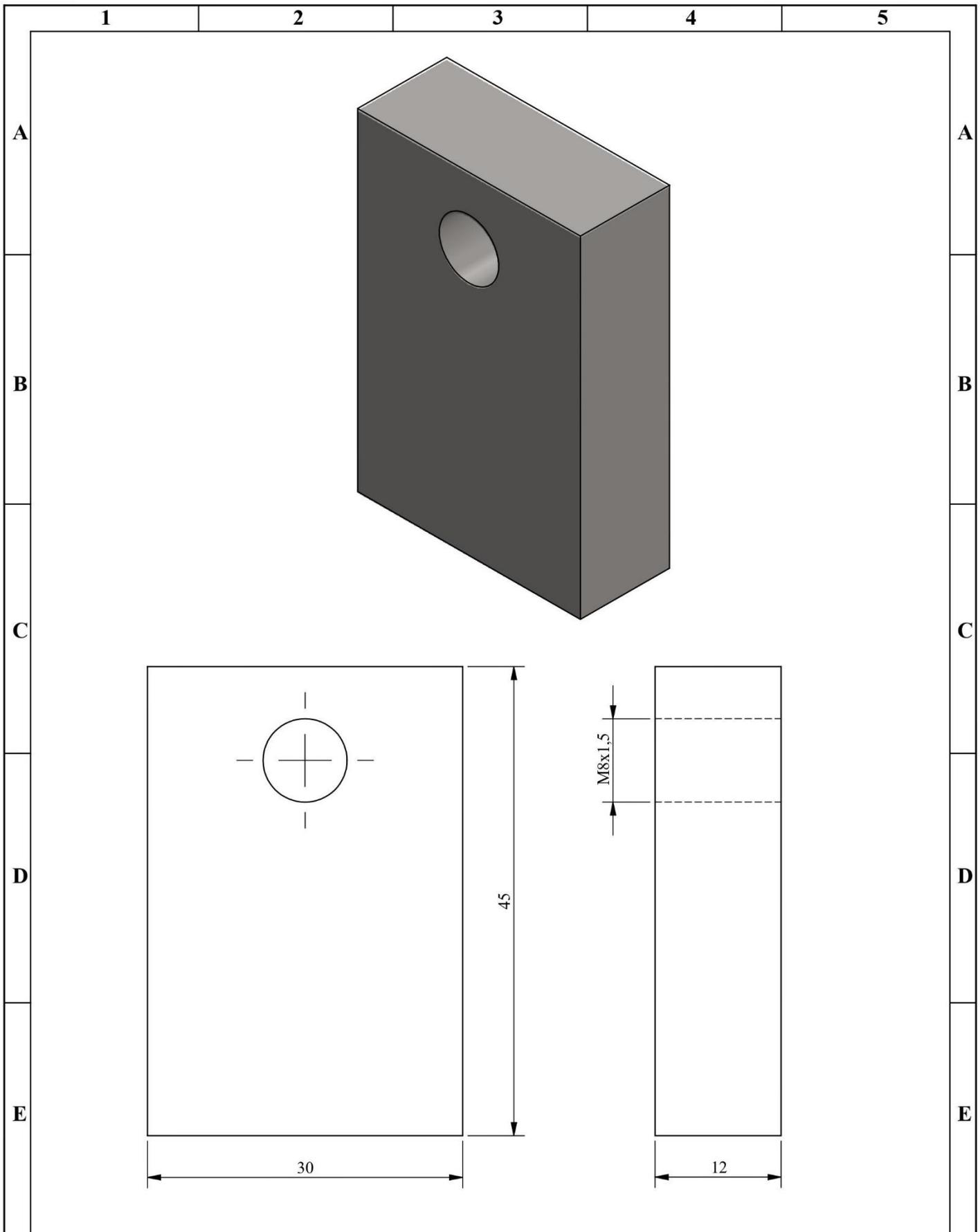
N°. Lámina: 8 de 18		N°. Hojas: 18		Sustitución:		Codificación: MFR-ES		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA INGENIERÍA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL							
Email: oscar.laura@epoch.edu.ec Teléfonos: 0981193586						Denominación: EJE SECUNDARIO						Peso [Kg]		Tolerancia	
Datos		Nombre		Firma		Fecha		0,24		±0,3 [mm]		1:1			
Proyectó		Vergara C.				2022/02/24		Materiales: AISI 1144							
Dibujó		Laura O.				2022/02/24									
Revisó		Ing. Naranjo E.				2022/02/24									
Aprobó		Ing. Naranjo E.				2022/02/24		Nombre de archivo: EJE SECUNDARIO.sldprt							



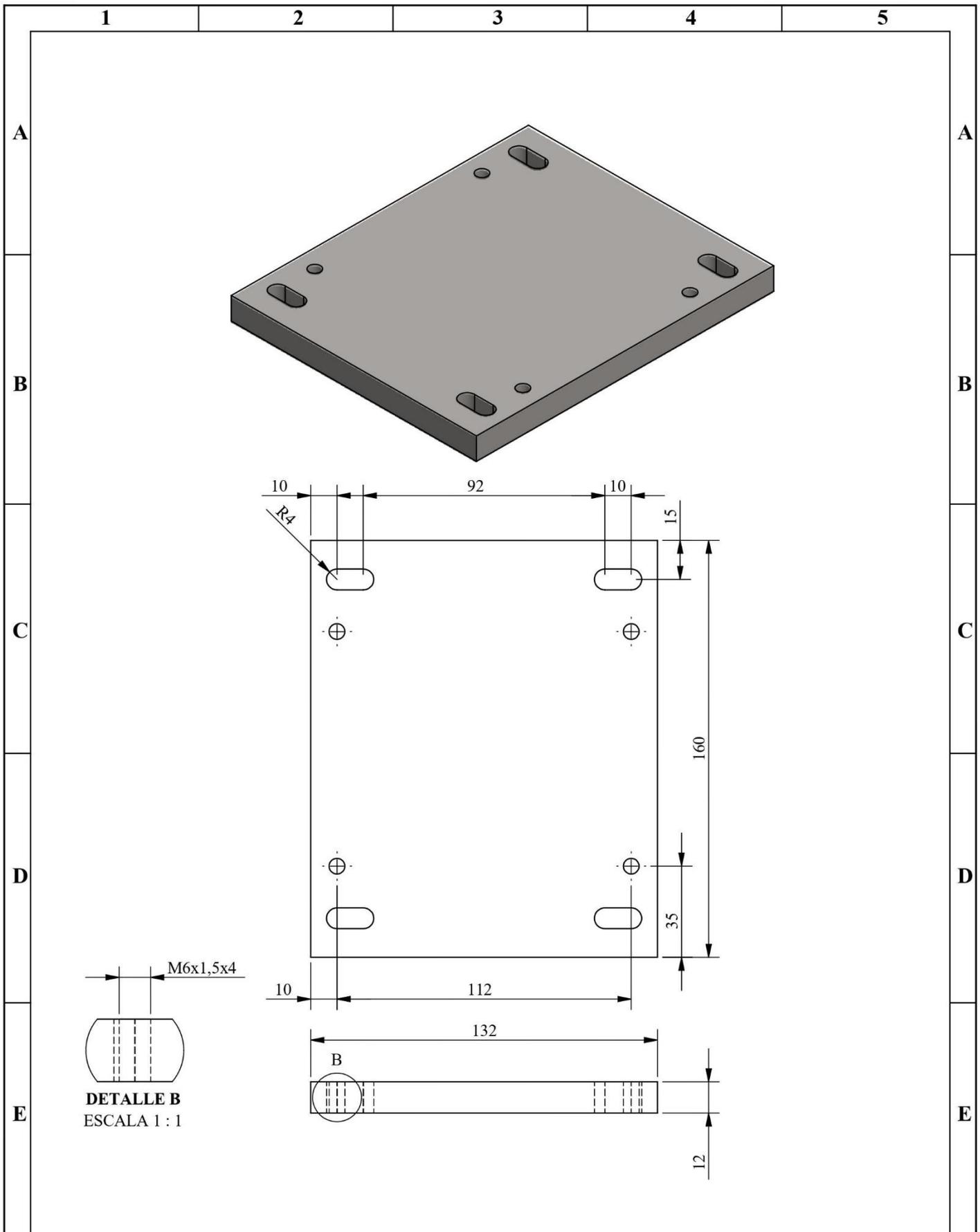
Nº. Lámina: 9 de 18		Nº. Hojas: 18		Sustitución:		Codificación: MFR-IN		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA INGENIERÍA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL			
Email: oscar.laura@esPOCH.edu.ec Teléfonos: 0981193586						Denominación: INSERTO					
Datos	Nombre	Firma	Fecha					0,01	±0,3 [mm]	2:1	
Proyectó	Vergara C.		2022/02/24								
Dibujó	Laura O.		2022/02/24								
Revisó	Ing. Naranjo E.		2022/02/24			Materiales: Aluminio					
Aprobó	Ing. Naranjo E.		2022/02/24			Nombre de archivo: INSERTO.sldprt					



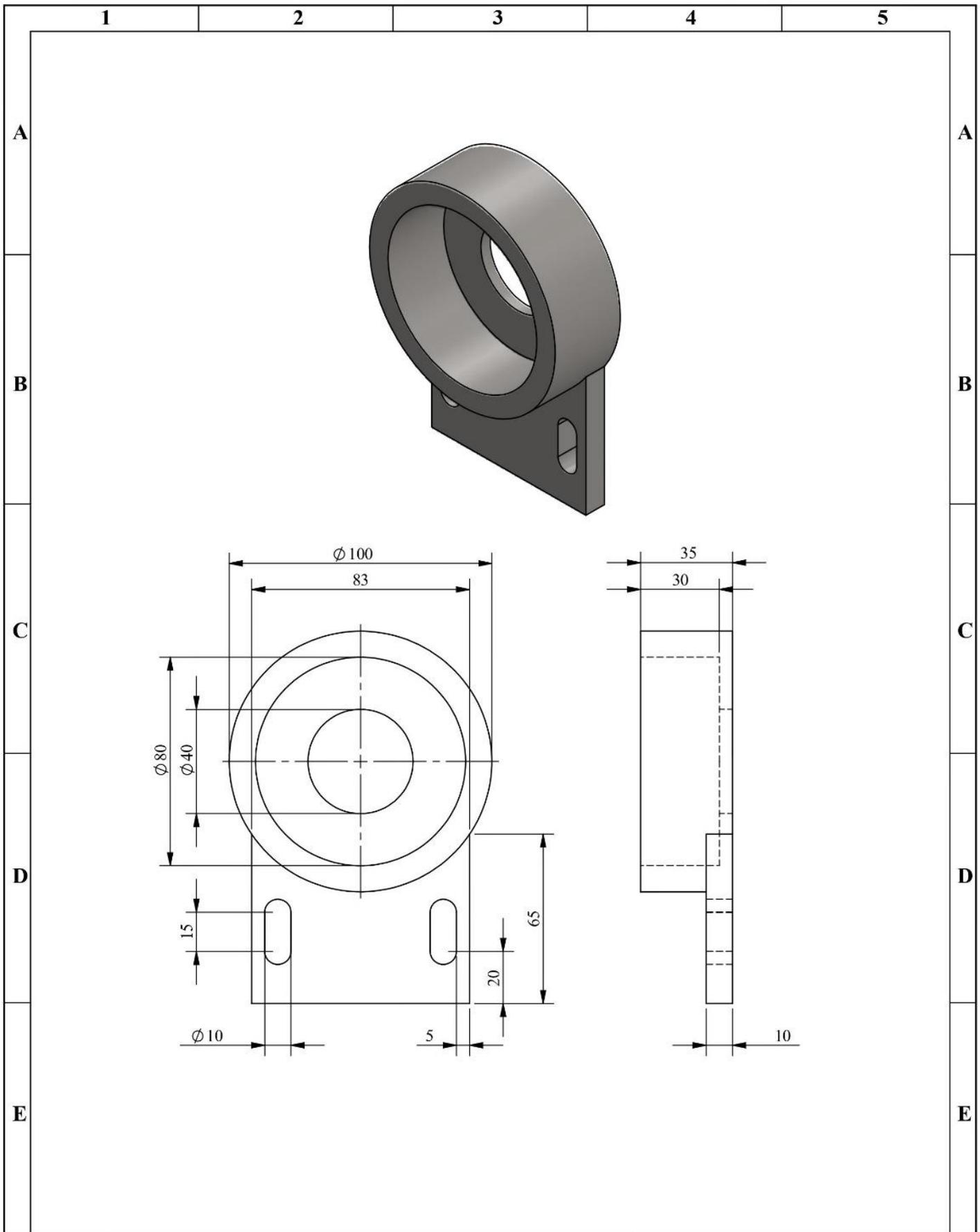
Nº. Lámina: 10 de 18		Nº. Hojas: 18		Sustitución:		Codificación: MFR-ME		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA INGENIERÍA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL			
Email: oscar.laura@epoch.edu.ec Teléfonos: 0981193586						Denominación: MOTOR ELÉCTRICO					
Datos	Nombre	Firma	Fecha					20,28	±0,3 [mm]	1:5	
Proyectó	Vergara C.		2022/02/24								
Dibujó	Laura O.		2022/02/24								
Revisó	Ing. Naranjo E.		2022/02/24			Materiales: Aluminio					
Aprobó	Ing. Naranjo E.		2022/02/24			Nombre de archivo: MOTOR ELÉCTRICO.sldprt					



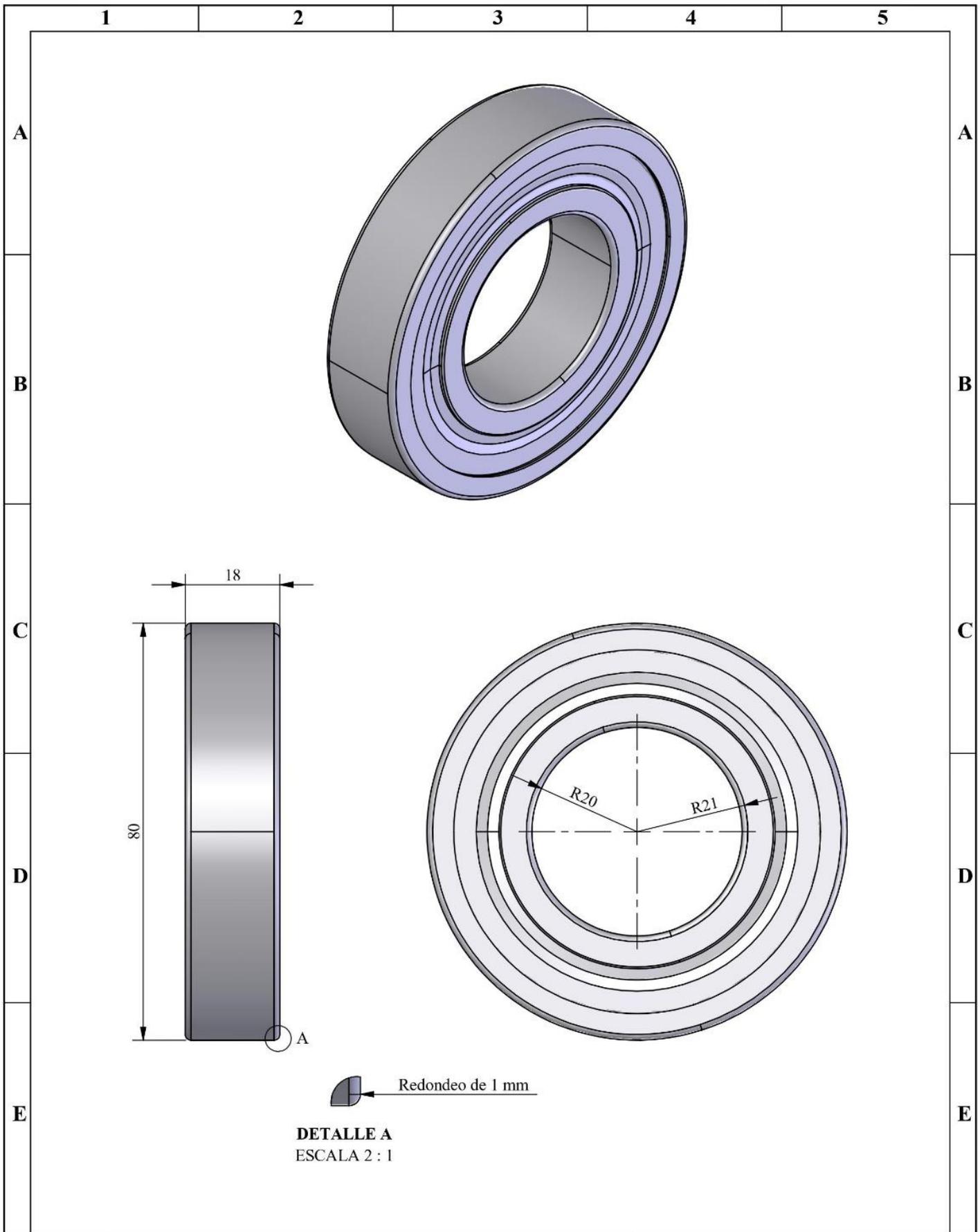
Nº. Lámina: 11 de 18		Nº. Hojas: 18		Sustitución:		Codificación: MFR-PD		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA INGENIERÍA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL							
Email: oscar.laura@epoch.edu.ec Teléfonos: 0981193586						Denominación: PLACA DE DESALINEACIÓN						Peso [Kg]		Tolerancia	
Datos		Nombre		Firma		Fecha		0,12		±0,3 [mm]		2:1			
Proyectó		Vergara C.				2022/02/24		Materiales: AISI 1020							
Dibujó		Laura O.				2022/02/24									
Revisó		Ing. Naranjo E.				2022/02/24									
Aprobó		Ing. Naranjo E.				2022/02/24		Nombre de archivo: PLACA DESALINEACIÓN.sldprt							



Nº. Lámina: 12 de 18		Nº. Hojas: 18		Sustitución:		Codificación: MFR-PM		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA INGENIERÍA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL			
Email: oscar.laura@epoch.edu.ec Teléfonos: 0981193586						Denominación: PLACA DEL MOTOR ELÉCTRICO					
Datos	Nombre	Firma	Fecha					1,94	±0,3 [mm]	1:2	
Proyectó	Vergara C.		2022/02/24								
Dibujó	Laura O.		2022/02/24	Materiales: AISI 1020							
Revisó	Ing. Naranjo E.		2022/02/24								
Aprobó	Ing. Naranjo E.		2022/02/24	Nombre de archivo: PLACA MOTOR.sldprt							

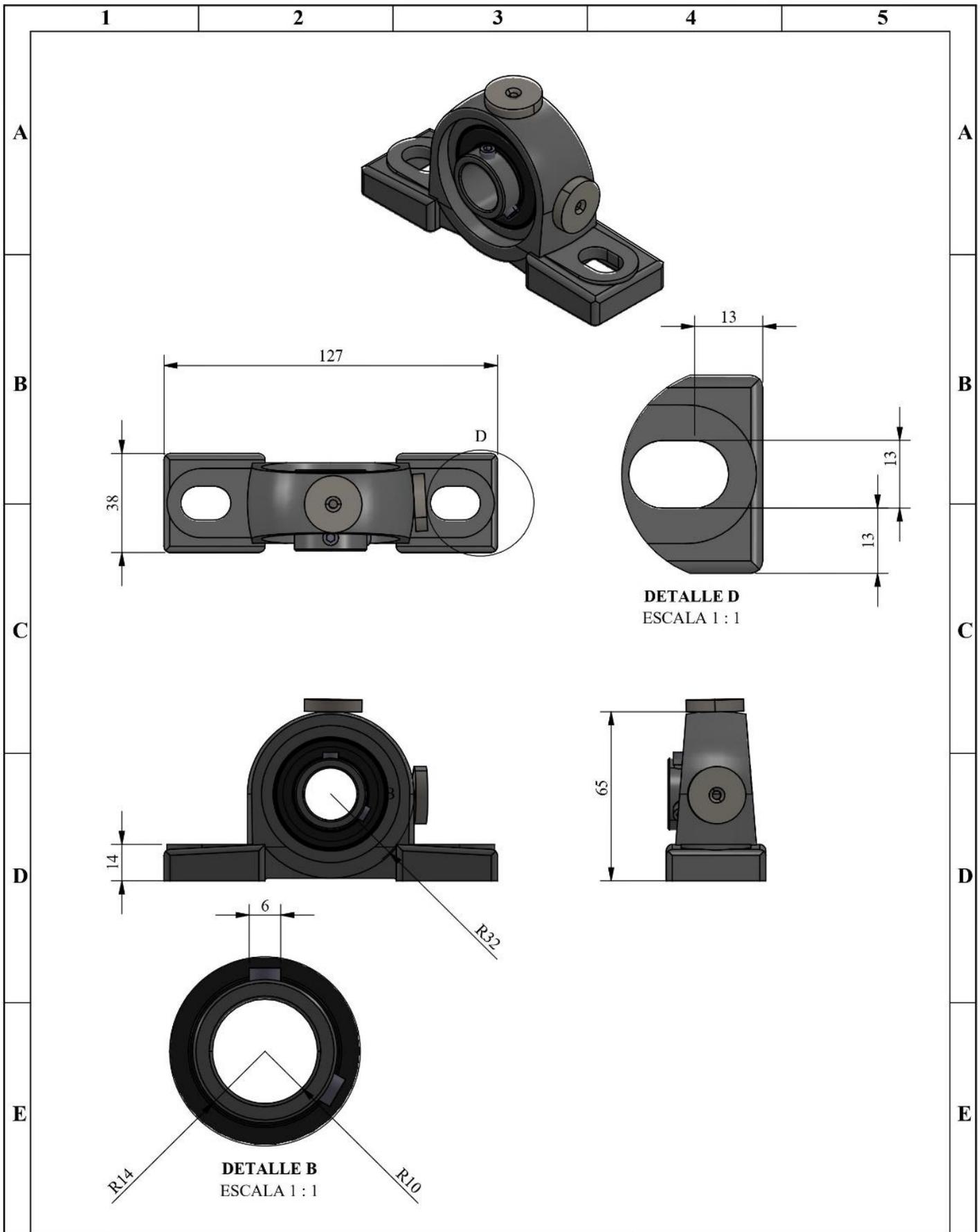


N°. Lámina: 13 de 18		N°. Hojas: 18		Sustitución:		Codificación: MFR-PR		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA INGENIERÍA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL							
Email: oscar.laura@epoch.edu.ec Teléfonos: 0981193586						Denominación: PORTA RODAMIENTOS						Peso [Kg]		Tolerancia	
Datos	Nombre	Firma	Fecha	Materiales: AISI 1020 Nombre de archivo: PORTA RODAMIENTOS.sldprt				1,22		±0,3 [mm]		1:2			
Proyectó	Vergara C.		2022/02/24												
Dibujó	Laura O.		2022/02/24												
Revisó	Ing. Naranjo E.		2022/02/24												
Aprobó	Ing. Naranjo E.		2022/02/24												

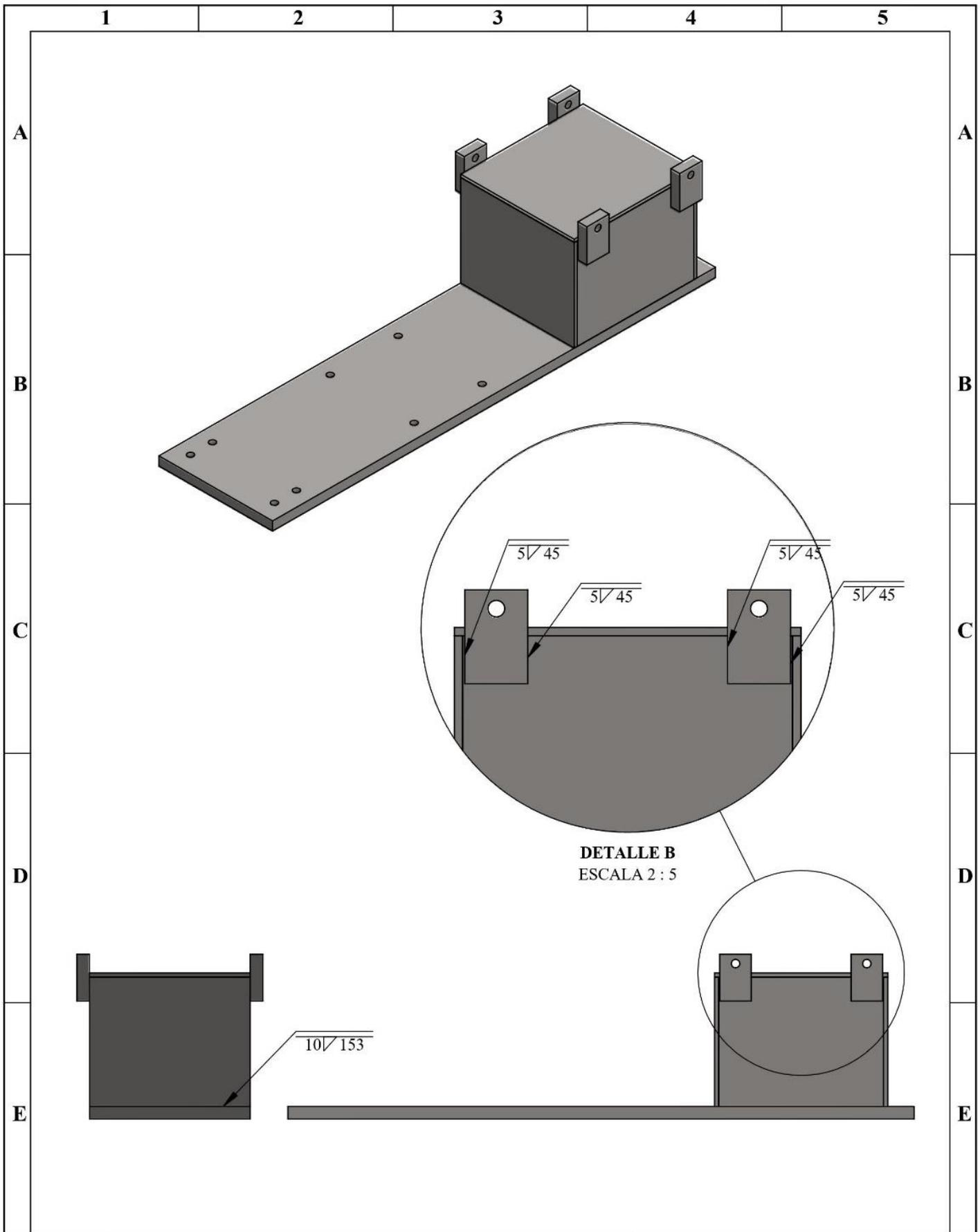


DETALLE A
ESCALA 2 : 1

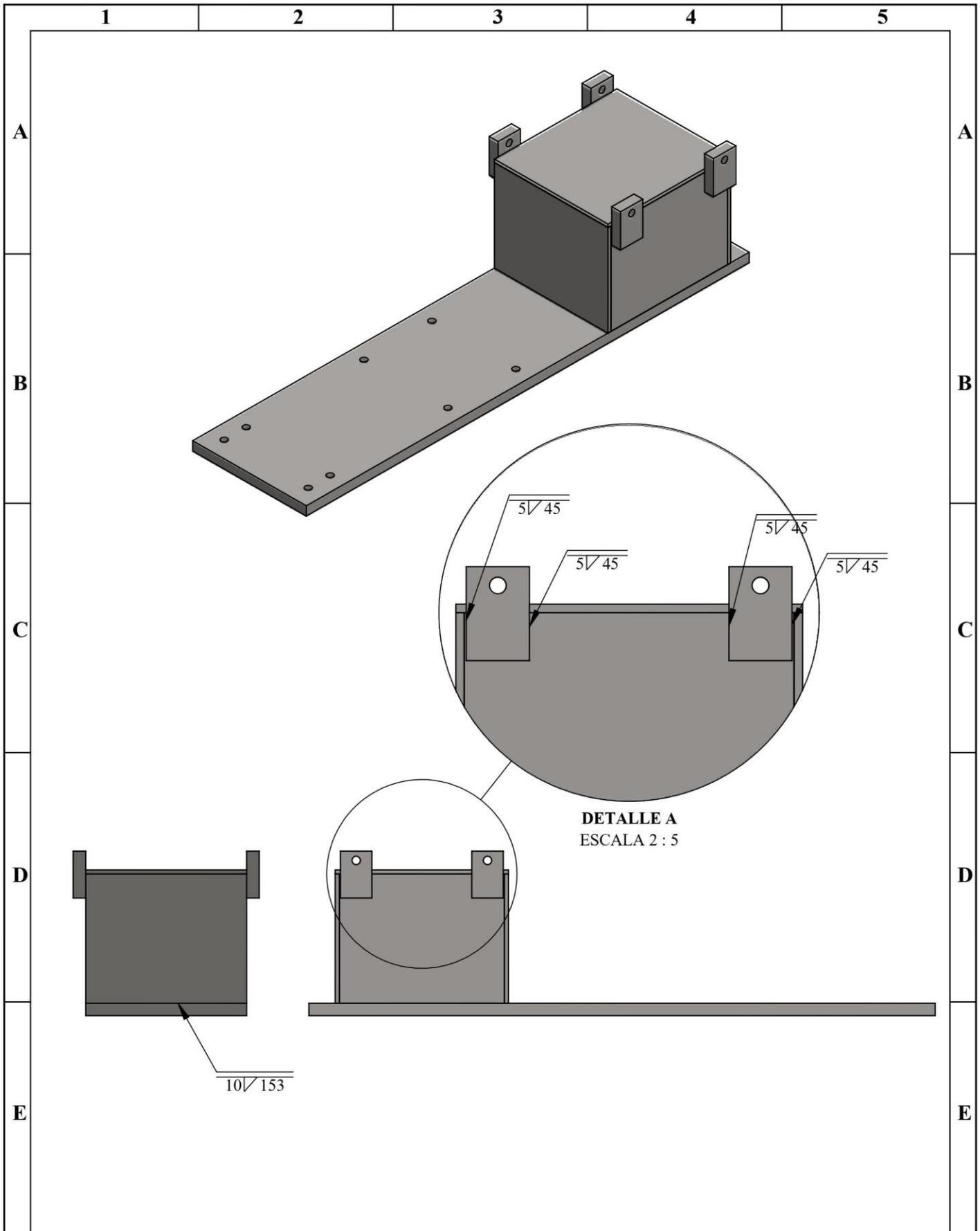
Nº. Lámina: 14 de 18		Nº. Hojas: 18		Sustitución:		Codificación: MFR-RO		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA INGENIERÍA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL			
Email: oscar.laura@esPOCH.edu.ec Teléfonos: 0981193586						Denominación: RODAMIENTO 6208					
Datos	Nombre	Firma	Fecha					0,33	±0,3 [mm]	1:1	
Proyectó	Vergara C.		2022/02/24								
Dibujó	Laura O.		2022/02/24								
Revisó	Ing. Naranjo E.		2022/02/24			Materiales: Acero al cromo					
Aprobó	Ing. Naranjo E.		2022/02/24			Nombre de archivo: RODAMIENTO.sldprt					



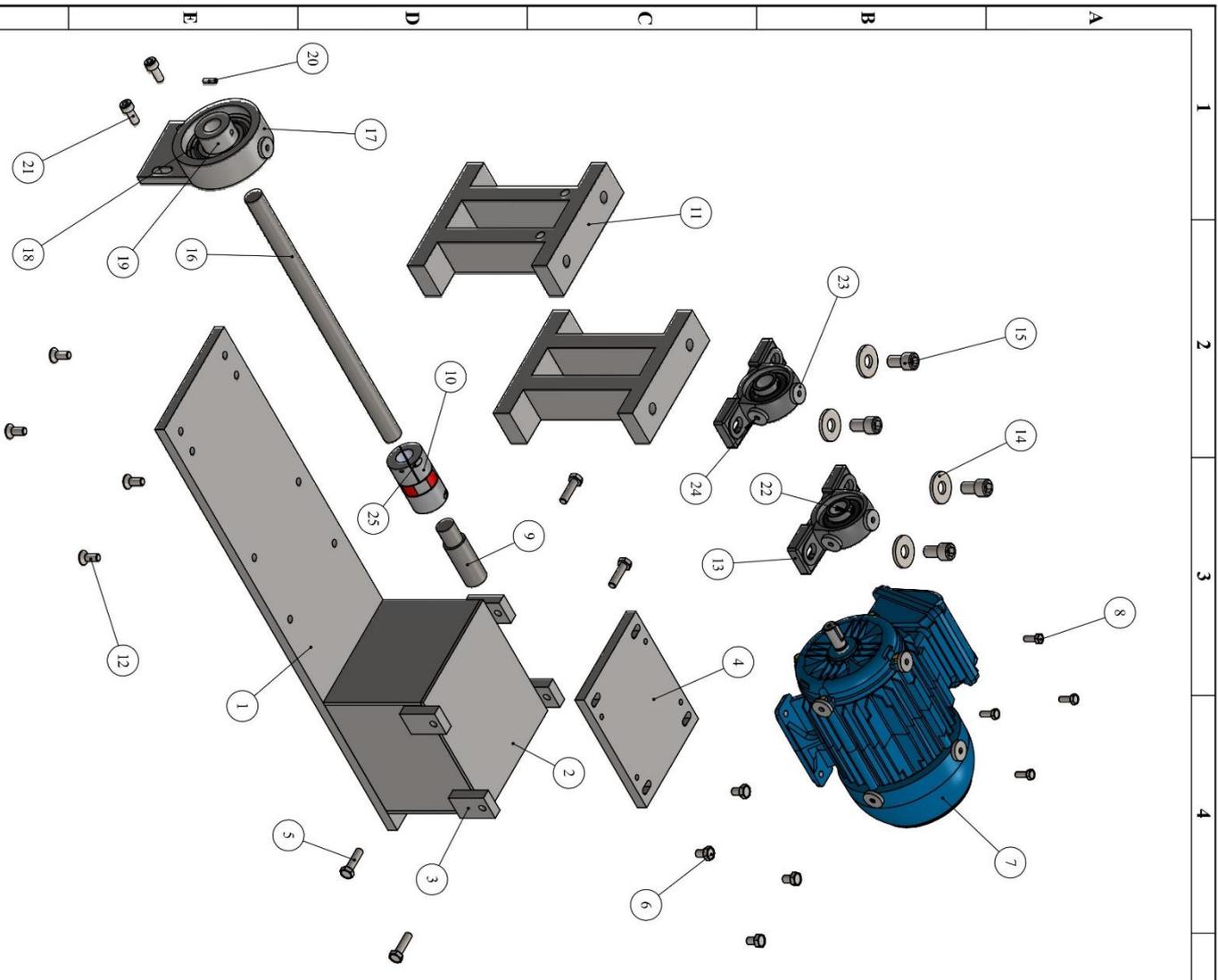
Nº. Lámina: 15 de 18		Nº. Hojas: 18		Sustitución:		Codificación: MFR-CH		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA INGENIERÍA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL							
Email: oscar.laura@epoch.edu.ec Teléfonos: 0981193586						Denominación: CHUMACERA						Peso [Kg]		Tolerancia	
Datos		Nombre		Firma		Fecha		0,1		±0,3 [mm]		1:2			
Proyectó		Vergara C.				2022/02/24		Materiales: Hierro fundido							
Dibujó		Laura O.				2022/02/24									
Revisó		Ing. Naranjo E.				2022/02/24		Nombre de archivo: CHUMACERA.sldprt							
Aprobó		Ing. Naranjo E.				2022/02/24									



Nº. Lámina: 16 de 18		Nº. Hojas: 18		Sustitución:		Codificación: MFR-BE		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA INGENIERÍA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL			
Email: oscar.laura@epoch.edu.ec Teléfonos: 0981193586						Denominación: SOLDADURAS EN LA BASE DEL MÓDULO					
Datos	Nombre	Firma	Fecha			Materiales: AISI 1020		12,32	±0,3 [mm]	1:5	
Proyectó	Vergara C.		2022/02/24								
Dibujó	Laura O.		2022/02/24								
Revisó	Ing. Naranjo E.		2022/02/24	Nombre de archivo: SOLDADURAS 01.sldprt							
Aprobó	Ing. Naranjo E.		2022/02/24								



Nº. Lámina: 17 de 18		Nº. Hojas: 18		Sustitución:		Codificación: MFR-BE		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA INGENIERÍA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL			
Email: oscar.laura@epoch.edu.ec Teléfonos: 0981193586						Denominación: SOLDADURAS EN LA BASE DEL MÓDULO					
Datos	Nombre	Firma	Fecha	Materiales: AISI 1020		12,32	±0,3 [mm]	1:5			
Proyectó	Vergara C.		2022/02/24	Nombre de archivo: SOLDADURAS 02.sldprt							
Dibujó	Laura O.		2022/02/24								
Revisó	Ing. Naranjo E.		2022/02/24								
Aprobó	Ing. Naranjo E.		2022/02/24								



N.º	N.º DE PIEZA	CANTIDAD	MATERIAL	PESO (kg)
1	BASE DEL MÓDULO DE SIMULACIÓN	1	AIISI 1020	8,60
2	BASE DEL MOTOR	1	AIISI 1020	3,23
3	PLACA DE DESALINEACIÓN	4	AIISI 1020	0,12
4	PLACA DEL MOTOR	1	AIISI 1020	1,94
5	PERNO HEXAGONAL DE DESALINEACIÓN	4	ACERO AL CARBONO	0,062
6	PERNO HEXAGONAL DE PLACA DEL MOTOR	4	ACERO AL CARBONO	0,062
7	MOTOR ELÉCTRICO WEG W22	1	ALUMINIO	20,28
8	TORNILLO HEXAGONAL DEL MOTOR	4	ACERO INOXIDABLE	0,057
9	EJE SECUNDARIO	1	AIISI 1144	0,24
10	ACOPLE FLEXIBLE	1	HIERRO	0,17
11	BASE DE LA CHUMACERA	2	AIISI 1020	4,30
12	TORNILLO DE CABEZA HUECA AVELLANADA	4	ACERO CON CARBONO BAJO	0,0013
13	CHUMACERA	2	HIERO FUNDIDO	0,1
14	ARANDELA PLANA DE CHUMACERA	4	ACERO INOXIDABLE	0,0027
15	PERNO HEXAGONAL HUECO DE CHUMACERA	4	ACERO CON CARBONO BAJO	0,0019
16	EJE PRINCIPAL	1	AIISI 1144	0,9
17	PORTA RODAMIENTOS	1	AIISI 1020	1,22
18	RODAMIENTO 6208	1	ACERO AL CROMIO	0,33
19	BOCÍN	1	AIISI 1020	0,33
20	TORNILLO DE FIJACIÓN	1	ACERO AL CARBONO	0,0003
21	PERNO HEXAGONAL HUECO DE PORTA RODAMIENTOS	2	ACERO AL CARBONO	0,0019
22	PRISIONERO DE CHUMACERA	4	ACERO AL CARBONO	0,0003
23	INSERTO PARA MEDICIÓN	10	ALUMINIO	0,01
24	TORNILLO DE INBIERTO	10	ACERO INOXIDABLE	0,0003
25	TORNILLO DE ACOPLE FLEXIBLE	4	ACERO INOXIDABLE	0,0003

N.º Lámina: 18 de 18		N.º Hojas: 18		Sustitución:		Configuración: FM-EMJ-LDTEE-MFR	
Email: oscar.laura@espoeh.edu.ec		Teléfonos: 0981193586		Denominación: VISTA EXPLOSIONADA		Facultad de Mecánica	
Datos		Nombre	Firma	Fecha	Ingeniería Mantenimiento Industrial		
Proyecto		Vergara C.		2022/02/24	Escala: 1:5		
Dibujó		Laura O.		2022/02/24	Registro		
Revisó		Ing. Naraño E.		2022/02/24	Materiales: SEGÚN DISEÑO		
Aprobó		Ing. Naraño E.		2022/02/24	Nombre de archivo: PLANO DE MONTAJE.sldprt		

