



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

**“IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE SIMULACIÓN PARA
EL DIAGNÓSTICO VIBRACIONAL DE LA EXCENTRICIDAD
ESTÁTICA DEL MOTOR DE INDUCCIÓN PARA EL ROTOR KIT
DEL LABORATORIO DE DIAGNÓSTICO TÉCNICO Y
EFICIENCIA ENERGÉTICA”**

Trabajo de integración curricular

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

AUTORES:

DARÍO MANUEL GAMARRA AUCANCELA

JORGE ANÍBAL PACA PALTÁN

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 LA EXCENTRICIDAD
ESTÁTICA DEL MOTOR DE INDUCCIÓN PARA EL ROTOR KIT
DEL LABORATORIO DE DIAGNÓSTICO TÉCNICO Y
EFICIENCIA ENERGÉTICA”**

Trabajo de integración curricular

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

AUTORES: DARÍO MANUEL GAMARRA AUCANCELA
JORGE ANÍBAL PACA PALTÁN

DIRECTOR: Ing. EDUARDO SEGUNDO HERNÁNDEZ DÁVILA

Riobamba – Ecuador

2022

©2022, Darío Manuel Gamarra Aucancela & Jorge Aníbal Paca Paltán

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

Nosotros, Darío Manuel Gamarra Aucancela y Jorge Aníbal Paca Paltán, 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.

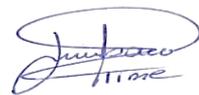
Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de integración curricular. El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 16 de marzo de 2022



Darío Manuel Gamarra Aucancela

C.I: 060489562-3



Jorge Aníbal Paca Paltán

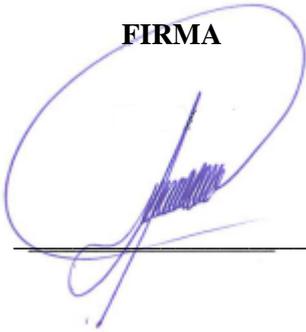
C.I: 060519140-2

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 LA EXCENRICIDAD ESTÁTICA DEL MOTOR DE INDUCCIÓN PARA EL ROTOR KIT DEL LABORATORIO DE DIAGNÓSTICO TÉCNICO Y EFICIENCIA ENERGÉTICA”**, realizado por los señores **DARÍO MANUEL GAMARRA AUCANCELA** y **JORGE ANÍBAL PACA PALTÁN**, 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		2022-03-16
Ing. Eduardo Segundo Hernández Dávila. DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2022-03-16
Ing. Eugenia Mercedes Naranjo Vargas. MIEMBRO DEL TRIBUNAL		2022-03-16

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación a mis padres José Alfredo y María Teresa, quienes han trabajado arduamente día tras día para hacerme crecer como profesional y como persona, en todo lo bueno y lo malo nunca me sentí solo, su cobijo me dio fuerzas para continuar y seguir adelante para alcanzar mis metas y objetivos de vida.

A mis hermanos y hermana Edison, Jhenny, Byron y Dennys quienes son un ejemplo de superación y perseverancia; de igual manera son la motivación en la realización de cada una de mis actividades y por ser el complemento en mi vida.

Darío

A mi madre, hijos, hermanos, esposa y amigos por el apoyo y amor incondicional que contribuyeron en mi formación como ingeniero, sin importar las derrotas, caídas y golpes que me dieron la vida, siempre me animaban a seguir adelante, el afán de ustedes fue verme convertir a más de un profesional en un excelente ser humano.

Flor, mi querida hermana que nunca me dejaste solo, buscaste la manera de apoyarme tanto moral como económicamente, gracias por confiar en mí, fuiste como un padre que motiva, inspira y un ejemplo a seguir, sin ti no hubiese logrado cumplir esta meta.

Jorge

AGRADECIMIENTO

En esencial, estoy agradecido de que Dios me haya dado la salud, el cuidado y la sabiduría necesarios para luchar en cada momento de mi vida y a través de estos para lograr mis metas actuales de rendimiento académico.

Finalmente, quiero expresar mi gratitud a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo y especialmente a mi querida escuela de Ingeniería en Mantenimiento Industrial, personal administrativo y docentes, quienes han brindado sus conocimiento técnicos y personales para hacerme parte de esta notoria profesión.

Darío

Agradezco a Dios de lo imposible, por darme la oportunidad de vivir, por darme la fuerza, la salud, el cuidado, la sabiduría, el entendimiento y la mayor bendición que son mis hijos, que fueron necesarios para culminar esta etapa tan importante, un enorme agradecimiento de corazón a toda la familia Paca Paltán, Paca Moyano por la confianza y el apoyo que me brindaron para seguir adelante.

Sin más que decir gracias mi querida ESPOCH y la carrera de Mantenimiento Industrial juntamente con todos los docentes que impartieron sus conocimientos con paciencia, perseverancia y motivación, así formar profesionales de excelencia y competentes en distintas áreas de la institución, empresa e industria.

Jorge

TABLA DE CONTENIDO

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

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA.....	3
1.1. Antecedentes.....	3
1.2. Planteamiento del problema.....	4
1.3. Justificación y actualidad.....	4
1.4. Objetivos.....	5
1.4.1. <i>Objetivo general</i>	5
1.4.2. <i>Objetivos específicos</i>	5

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Máquinas rotativas.....	7
2.2. Motor de inducción.....	7
2.2.1. <i>Componentes externos e internos del motor de inducción</i>	8
2.3. Entrehierro.....	9
2.4. El motor de inducción en la industria.....	9
2.5. Fallas en el motor de inducción.....	9
2.5.1. <i>Fallas en rodamientos</i>	10
2.5.2. <i>Fallas en el estator</i>	10
2.5.3. <i>Otros tipos de fallas</i>	11
2.5.4. <i>Fallas en el rotor</i>	11
2.6. Vibraciones en el motor de inducción.....	12
2.7. Excentricidad.....	12

2.8.	Tipos de excentricidad	13
2.8.1.	<i>Excentricidad estática</i>	13
2.8.2.	<i>Excentricidad dinámica</i>	15
2.8.3.	<i>Excentricidad mixta</i>	17
2.9.	Coefficiente de correlación de Pearson	18
2.10.	Transformada rápida de Fourier	18
2.11.	Diagnóstico de máquinas eléctricas rotatorias empleando la FFT	19
2.12.	Diagnóstico de la excentricidad estática	20
2.12.1.	<i>Detección a través de análisis de corriente</i>	21
2.12.1.1.	<i>Análisis de la corriente del estator con excentricidad estática</i>	21
2.12.1.2.	<i>Corriente de secuencia pseudo cero</i>	23
2.12.2.	<i>Detección a través del análisis de vibraciones</i>	23
2.12.2.1.	<i>Análisis de vibraciones mecánicas generadas por excentricidad estática</i>	24
2.12.2.2.	<i>Análisis espectral de vibraciones con excentricidad estática</i>	24

CAPÍTULO III

3.	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL MÓDULO DE SIMULACIÓN	26
3.1.	Reconocimiento de equipos y herramientas	26
3.1.1.	<i>Herramientas computacionales de diseño</i>	26
3.1.2.	<i>Herramientas computacionales de diagnóstico técnico</i>	26
3.1.3.	<i>Herramientas para la ejecución de mecanizado</i>	28
3.1.4.	<i>Instrumentos de medición</i>	28
3.1.5.	<i>Máquinas y herramientas de construcción</i>	29
3.1.6.	<i>Equipos y accesorios de acople</i>	29
3.2.	Determinación de los parámetros de operación del módulo de simulación	30
3.2.1.	<i>Determinación de los parámetros del motor con excentricidad estática</i>	30
3.2.2.	<i>Determinación de los parámetros de funcionamiento eléctrico de la bomba</i>	31
3.2.3.	<i>Determinación de los parámetros del fluido</i>	33
3.2.4.	<i>Determinación de componentes de transporte del fluido</i>	33
3.2.5.	<i>Determinación de los requerimientos de carga</i>	34
3.2.6.	<i>Determinación de los parámetros del material para el soporte del módulo</i>	34
3.3.	Diseño y ensamble del módulo de simulación para el diagnóstico vibracional de la excentricidad estática	35
3.3.1.	<i>Diseño de la placa base del módulo</i>	35
3.3.2.	<i>Diseño de la placa superior del módulo</i>	35
3.3.3.	<i>Diseño de la estructura de soporte</i>	36

3.3.4.	<i>Modelado de la bomba periférica</i>	37
3.3.5.	<i>Modelado de tuberías y accesorios del módulo</i>	37
3.3.6.	<i>Ensamblado general del módulo de simulación de excentricidad estática</i>	38
3.4.	Construcción y montaje del módulo de simulación	39
3.4.1.	<i>Adquisición de equipos y materiales</i>	40
3.4.2.	<i>Mecanizado de piezas metálicas</i>	40
3.4.2.1.	<i>Corte de las piezas</i>	40
3.4.2.2.	<i>Rectificado de las piezas</i>	41
3.4.2.3.	<i>Perforaciones de las piezas según los requerimientos</i>	41
3.4.3.	<i>Soldadura de las piezas</i>	42
3.4.4.	<i>Pintado de las piezas</i>	42
3.4.5.	<i>Puntos de medición para diagnosticar la falla de excentricidad estática</i>	43
3.4.6.	<i>Limpieza, instalación y montaje de las piezas y equipos en general</i>	44
3.5.	Manual de mantenimiento y de operación	45
3.5.1.	<i>Manual de mantenimiento</i>	45
3.5.2.	<i>Manual de operación</i>	46
3.6.	Análisis de modos de fallos y sus efectos	47
3.7.	Plan de mantenimiento	51
3.7.1.	<i>Listado de equipos</i>	51
3.7.2.	<i>Inventario técnico de mantenimiento</i>	52
3.7.3.	<i>Codificación del inventario técnico</i>	52
3.7.4.	<i>Ficha técnica</i>	52
3.7.5.	<i>Tareas y frecuencias de mantenimiento</i>	54
3.7.6.	<i>Plan de mantenimiento preventivo</i>	54
3.8.	Elaboración de la guía de laboratorio	55

CAPÍTULO IV

4.	MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	57
4.1.	Criterios para pruebas y adquisición datos	57
4.1.1.	<i>Condiciones de ajuste del Vibracheck ABG 200</i>	57
4.1.2.	<i>Configuración del software MAINTraQ Predictive</i>	58
4.2.	Frecuencia natural de los módulos de simulación	60
4.3.	Detección de excentricidad estática en el motor de inducción	62
4.3.1.	<i>Espectros de vibraciones mecánicas en el motor de inducción de las bombas</i>	63
4.3.1.1.	<i>Espectro de vibración mecánica a mínima carga del módulo 1</i>	63
4.3.1.2.	<i>Espectro de vibración mecánica a mínima carga del módulo 2</i>	64

4.3.1.3.	<i>Espectro de vibración mecánica a mínima carga del módulo 3</i>	65
4.3.1.4.	<i>Espectro de vibración mecánica a mínima carga del módulo 4</i>	65
4.3.1.5.	<i>Espectro de vibración mecánica a máxima carga del módulo 1</i>	66
4.3.1.6.	<i>Espectro de vibración mecánica a máxima carga del módulo 2</i>	67
4.3.1.7.	<i>Espectro de vibración mecánica a máxima carga del módulo 3</i>	68
4.3.1.8.	<i>Espectro de vibración mecánica a máxima carga del módulo 4</i>	68
4.3.1.9.	<i>Espectro de vibraciones mecánicas en cascada a distintas cargas del módulo 1</i>	69
4.3.2.	Frecuencias y amplitudes de armónicos de velocidad en el motor de inducción	70
4.3.2.1.	<i>Frecuencias de armónicos en el motor con excentricidad estática del módulo 1</i>	70
4.3.2.2.	<i>Frecuencias de armónicos en el motor con excentricidad estática del módulo 2</i>	71
4.3.2.3.	<i>Frecuencias de armónicos en el motor con excentricidad estática del módulo 3</i>	72
4.3.2.4.	<i>Frecuencias de armónicos en el motor con excentricidad estática del módulo 4</i>	72
4.3.2.5.	<i>Amplitudes de armónicos en el motor con excentricidad estática del módulo 1</i>	73
4.3.2.6.	<i>Amplitudes de armónicos en el motor con excentricidad estática del módulo 2</i>	73
4.3.2.7.	<i>Amplitudes de armónicos en el motor con excentricidad estática del módulo 3</i>	74
4.3.2.8.	<i>Amplitudes de armónicos en el motor con excentricidad estática del módulo 4</i>	74
4.4.	Análisis e interpretación de datos	75
4.4.1.	Análisis de vibraciones mecánicas con excentricidad estática	75
4.4.1.1.	<i>Análisis de resultados de datos de las frecuencias del módulo 1</i>	75
4.4.1.2.	<i>Análisis de resultados de datos de las frecuencias del módulo 2</i>	76
4.4.1.3.	<i>Análisis de resultados de datos de las frecuencias del módulo 3</i>	77
4.4.1.4.	<i>Análisis de resultados de datos de las frecuencias del módulo 4</i>	78
4.4.1.5.	<i>Análisis de resultados de datos de las amplitudes del módulo 1</i>	78
4.4.1.6.	<i>Análisis de resultados de datos de las amplitudes del módulo 2</i>	79
4.4.1.7.	<i>Análisis de resultados de datos de las amplitudes del módulo 3</i>	79
4.4.1.8.	<i>Análisis de resultados de datos de las amplitudes del módulo 4</i>	80
4.4.2.	Test de correlación de las bombas periféricas	81
	CONCLUSIONES	91
	RECOMENDACIONES	93
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2:	Fallos más habituales en el devanado del estator	11
Tabla 2-2:	Principales señales estudiadas para prevenir fallas en el rotor	12
Tabla 3-2:	Relación tiempo – vibraciones	17
Tabla 1-3:	Hoja de resumen de SolidWorks Académico	27
Tabla 2-3:	Hoja de resumen de MAINTraQ Predictive	27
Tabla 3-3:	Listado de equipos y accesorios para el módulo de excentricidad estática	29
Tabla 4-3:	Características de la bomba periférica.....	30
Tabla 5-3:	Tabla de calibre de conductores AWG.....	32
Tabla 6-3:	Especificaciones del fluido refrigerante	33
Tabla 7-3:	Propiedades mecánicas del ACERO SAE 1010	35
Tabla 8-3:	Propiedades del pegamento epóxico pegatanke	44
Tabla 9-3:	Manual de operación del módulo de simulación	48
Tabla 10-3:	Criterios de gravedad o severidad de fallos.....	49
Tabla 11-3:	Criterios de probabilidad de ocurrencia.....	49
Tabla 12-3:	Criterios de probabilidad de no detección	49
Tabla 13-3:	Análisis de modos de fallos y sus efectos.....	40
Tabla 14-3:	Listado de equipos y componentes	51
Tabla 15-3:	Codificación del módulo de simulación	52
Tabla 16-3:	Ficha técnica para el módulo de simulación.....	53
Tabla 17-3:	Ficha técnica para el módulo de simulación.....	54
Tabla 18-3:	Plan de mantenimiento preventivo	54
Tabla 19-3:	Contenido de la guía de laboratorio.....	56
Tabla 1-4:	Configuración de las propiedades de la máquina	58
Tabla 2-4:	Configuración de las propiedades de los puntos de vibración.....	59
Tabla 3-4:	Configuración de las propiedades del espectro de la variable velocidad	59
Tabla 4-4:	Configuración de las propiedades del espectro de la variable aceleración.....	59
Tabla 5-4:	Frecuencias naturales de los armónicos de velocidad en las bombas.....	61
Tabla 6-4:	Rangos de frecuencias de funcionamiento de las bombas periféricas	62
Tabla 7-4:	Frecuencias de armónicos de velocidad con excentricidad estática del módulo 1 ..	71
Tabla 8-4:	Frecuencias de armónicos de velocidad con excentricidad estática del módulo 2 ..	71
Tabla 9-4:	Frecuencias de armónicos de velocidad con excentricidad estática del módulo 3 ..	72
Tabla 10-4:	Frecuencias de armónicos de velocidad con excentricidad estática del módulo 4 ..	72
Tabla 11-4:	Amplitudes de armónicos de velocidad con excentricidad estática del módulo 1 ...	73
Tabla 12-4:	Amplitudes de armónicos de velocidad con excentricidad estática del módulo 2 ...	74

Tabla 13-4: Amplitudes de armónicos de velocidad con excentricidad estática del módulo 3...74

Tabla 14-4: Amplitudes de armónicos de velocidad con excentricidad estática del módulo 4...74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2: Constitución de una máquina eléctrica rotativa	7
Figura 2-2: Motor asíncrono de inducción.....	8
Figura 3-2: Vista en corte y partes de un motor de inducción	8
Figura 4-2: Fallas en motores de inducción clasificada por pieza	10
Figura 5-2: Motor sin excentricidad (a), Motor con excentricidad estática (b)	14
Figura 6-2: Forma de producirse la excentricidad estática	14
Figura 7-2: Espectro referencial de la excentricidad estática	15
Figura 8-2: Motor con excentricidad dinámica.....	16
Figura 9-2: Forma de producirse la excentricidad estática	16
Figura 10-2: Espectro por falla de la excentricidad dinámica	16
Figura 11-2: Excentricidad mixta	17
Figura 12-2: Discretización y transformación de un registro vibroacústico	19
Figura 13-2: Armónicos laterales inferior y lateral superior de las corrientes.....	20
Figura 14-2: Espectro de la corriente del estator con un grado de excentricidad estática	22
Figura 15-2: Espectro típico de la excentricidad estática	24
Figura 16-2: Espectro de la corriente del estator: (a) saludable y (b) excentricidad estática.....	25
Figura 1-3: Bomba periférica MILANO	31
Figura 2-3: Vista lateral del módulo	34
Figura 3-3: Vista isométrica de la placa base	36
Figura 4-3: Vista isométrica de la placa superior	36
Figura 5-3: Vista isométrica de la placa superior	36
Figura 6-3: Vista isométrica de la bomba periférica.....	37
Figura 7-3: Vista isométrica de la tubería.....	37
Figura 8-3: Vista isométrica de la unión universal	38
Figura 9-3: Vista isométrica de la válvula de esfera.....	38
Figura 10-3: Vista isométrica del módulo ensamblado	38
Figura 11-3: Proceso de construcción del módulo de simulación	39
Figura 12-3: Compra de materiales	40
Figura 13-3: Proceso de corte de tubos cuadrados y planchas.....	41
Figura 14-3: Rectificado de las planchas superior e inferior	41
Figura 15-3: Proceso de perforaciones	42
Figura 16-3: Proceso de soldadura y desbaste	42
Figura 17-3: Proceso de aplicación de fondeo y pintura.....	43
Figura 18-3: Montaje de insertos	43

Figura 19-3: Módulo de simulación de la excentricidad estática.....	45
Figura 20-3: Contenido del manual de mantenimiento.....	46
Figura 21-3: Esquema de los niveles jerárquicos para inventario del módulo de simulación	52
Figura 1-4: Ubicación del acelerómetro en dirección radial horizontal.....	60
Figura 2-4: Espectro de la frecuencia natural de la bomba periférica 1	61
Figura 3-4: Medición y detección de excentricidad estática en el motor de inducción	63
Figura 4-4: Espectro de velocidad con excentricidad estática a carga mínima del módulo 1 ..	64
Figura 5-4: Espectro de velocidad con excentricidad estática a carga mínima del módulo 2 ..	64
Figura 6-4: Espectro de velocidad con excentricidad estática a carga mínima del módulo 3 ..	65
Figura 7-4: Espectro de velocidad con excentricidad estática a carga mínima del módulo 4 ..	66
Figura 8-4: Espectro de velocidad con excentricidad estática a carga máxima del módulo 1 ..	66
Figura 9-4: Espectro de velocidad con excentricidad estática a carga máxima del módulo 2 ..	67
Figura 10-4: Espectro de velocidad con excentricidad estática a carga máxima del módulo 3 ..	68
Figura 11-4: Espectro de velocidad con excentricidad estática a carga máxima del módulo 4 ..	69
Figura 12-4: Cascadas de espectros de 0 a 35 psi	69
Figura 13-4: Declaración de variables en RStudio	81
Figura 14-4: Pruebas de correlación de la bomba periférica 1	82
Figura 15-4: Pruebas de correlación de la bomba periférica 2	84
Figura 16-4: Pruebas de correlación de la bomba periférica 3	86
Figura 17-4: Pruebas de correlación de la bomba periférica 4	88

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-4: Curva característica de carga vs frecuencia.....	76
Gráfico 2-4: Curva característica de carga vs frecuencia.....	77
Gráfico 3-4: Curva característica de carga vs frecuencia.....	77
Gráfico 4-4: Curva característica de carga vs frecuencia.....	78
Gráfico 5-4: Curva característica de carga vs amplitud de la bomba 1.....	78
Gráfico 6-4: Curva característica de carga vs amplitud de la bomba 2.....	79
Gráfico 7-4: Curva característica de carga vs amplitud de la bomba 3.....	80
Gráfico 8-4: Curva característica de carga vs amplitud de la bomba 4.....	80
Gráfico 9-4: Correlograma de la bomba periférica 1	83
Gráfico 10-4: Correlograma de la bomba periférica 2	85
Gráfico 11-4: Correlograma de la bomba periférica 3	87
Gráfico 12-4: Correlograma de la bomba periférica 4	89

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: DISEÑO DEL MÓDULO DE SIMULACIÓN DE EXCENTRICIDAD ESTÁTICA.

ANEXO B: MANUAL DE MANTENIMIENTO.

ANEXO C: GUÍA PRÁCTICA DE LABORATORIO.

RESUMEN

El objetivo del presente proyecto técnico, es implementar un módulo de simulación para diagnosticar fallas de excentricidad estática que se presentan en los motores de inducción. Se eligió este tipo de motor para contribuir al diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas puesto que es muy popular en el entorno industrial. Inicialmente para la construcción del módulo se seleccionó los instrumentos y parámetros de funcionamiento de los equipos, siendo la bomba periférica el equipo principal del módulo con presencia de falla; posteriormente se realizó el diseño y modelado de los elementos constitutivos mediante el software SolidWorks Académico, como finalmente en la etapa de construcción se instaló y se ensambló cada subsistema para llegar a la etapa de operación y prueba. La metodología utilizada para el diagnóstico y detección de falla de excentricidad estática se realizó mediante la técnica del análisis espectral de vibraciones mecánicas, para ello se vio necesario simular cargas mediante presiones variables estrangulando el caudal del fluido por medio de la válvula de esfera en la línea de descarga del sistema de bombeo. Para el análisis e interpretación de resultados se recopiló datos mediante el colector de vibraciones Vibracheck ABG 200 sobre el punto rígido denominado inserto o target en el plano radial horizontal de la bomba, que conjuntamente con el software MAINTraQ Predictive se logró identificar los armónicos y espectros característicos de falla; por medio de ellos se elaboró curvas para evidenciar que la excentricidad estática presenta armónicos característicos a frecuencias específicas, siendo esta el doble de la frecuencia de línea (2FL), concluyendo que los armónicos a 120 Hz permanecen constantes independientemente de la carga representando a la falla de excentricidad estática. Para corroborar que el incremento de la presión no afecta a la variable 2FL se recomienda realizar el test de correlación con un 95% de confianza.

Palabras clave: <MÓDULO DE SIMULACIÓN> <EXCENTRICIDAD ESTÁTICA>, <DIAGNÓSTICO Y DETECCIÓN DE FALLA>, <ANÁLISIS ESPECTRAL DE VIBRACIONES>, <FRECUENCIA DE LÍNEA>, <FRECUENCIA NATURAL>



Firmado electrónicamente por:
HOLGER GERMAN
RAMOS UVIDIA

0662-DBRA-UPT-2022

2022-04-12

SUMMARY

The objective of this technical project was to implement a simulation module to diagnose static eccentricity faults that occur in induction motors. This type of motor was chosen to help diagnose rotating electrical machines as it is very popular in the industrial environment. Initially, for the construction of the module, the instruments and operating parameters of the equipment were selected, with the peripheral pump being the main equipment of the module with the presence of a fault. Subsequently, the design and modeling of the constituent elements was carried out using the SolidWorks Academic software. Finally, in the construction stage, each subsystem was installed and assembled to reach the operation and test stage. The methodology used for the diagnosis and detection of static eccentricity failure was carried out through the technique of spectral analysis of mechanical vibrations, for which it was necessary to simulate loads through variable pressures, strangling the fluid flow through the ball valve in the line pumping system discharge. For the analysis and interpretation of results, data was collected using the Vibracheck ABG 200 vibration collector on the rigid point called insert or target in the horizontal radial plane of the pump, which together with the MAINTraq Predictive software was able to identify the harmonics and characteristic spectra of fault; by means of them, curves were elaborated to show that the static eccentricity presents characteristic harmonics at specific frequencies, this being twice the line frequency (2FL). It concludes that the harmonics at 120 Hz remain constant regardless of the load representing the static eccentricity failure. To confirm that the increase in pressure does not affect the 2FL variable, it is recommended to carry out the correlation test with 95% confidence.

Keywords: <SIMULATION MODULE>, <STATIC ECCENTRICITY>, <DIAGNOSTICS AND FAULT DETECTION>, <SPECTRAL ANALYSIS OF VIBRATIONS>, <LINE FREQUENCY>, <NATURAL FREQUENCY>

SANDRA
PAULINA
PORRAS
PUMALEMA

Firmado digitalmente
por SANDRA PAULINA
PORRAS PUMALEMA
Fecha: 2022.04.19
14:01:43 -05'00'

INTRODUCCIÓN

El diagnóstico de falla de excentricidad estática para motores de inducción, es fundamental para una operación confiable en los procesos industriales, es más, permite el control de calidad de máquinas, especialmente durante su proceso de fabricación. La implementación de un módulo de simulación para el diagnóstico vibracional de la excentricidad estática del motor de inducción para el rotor kit del laboratorio de diagnóstico técnico y eficiencia energética se realizó en cuatro capítulos mismo que se desarrolla a continuación.

En el primer capítulo se describe la problemática que existe en la ESPOCH en particular la Carrera de Mantenimiento Industrial relacionado a la adquisición de los equipos de diagnóstico vibracional mismos que justifiquen la formación de profesionales en Mantenimiento Industrial a través de las prácticas de laboratorios, los cuales deben estar equipados con módulos de prueba e instrumentos adecuados para simular un entorno de trabajo casi idéntico a la que se desarrolla dentro de la industria, de tal forma que los estudiantes puedan experimentar, practicar y aprender técnicas de detección de fallas en motores de inducción.

En el capítulo dos se fundamenta el estado de arte referente al diagnóstico de la excentricidad estática en los motores de inducción según varias investigaciones, artículos y autores. Teniendo en cuenta que motor de inducción es uno de los equipos que está presentes prácticamente en todos los sistemas que necesiten generar movimiento como son las cintas transportadoras, las bombas hidráulicas, los compresores, los agitadores, etc., es necesario crear un método de mantenimiento basado en la condición para la monitorización del estado del motor con el fin de predecir el momento exacto de sustitución de sus elementos, para la disminución de los costes por paradas inesperadas y de mantenimiento, haciendo que nuestra institución, empresa e industria sea más competitiva (Gallegos, 2018, p.1).

En el tercer capítulo se explica la implementación del módulo de simulación, iniciando con el reconocimiento de equipos-herramientas, determinación de los parámetros de operación del módulo, el diseño y ensamble del módulo de simulación para el diagnóstico de la excentricidad estática del motor de inducción. En este capítulo también se realiza un manual de operación, plan de mantenimiento y la guía práctica de laboratorio mismos que sirven como aporte para el estudiante y el docente de la cátedra de Diagnóstico Técnico.

En el capítulo cuatro se evidencia los armónicos característicos de falla que se presentan en los espectros de velocidad correspondientes a la excentricidad estática mediante la técnica del análisis

espectral de vibraciones mecánicas. Además, se verificó que la frecuencia característica de falla (2FL) correspondiente a la excentricidad estática se mantiene constante independientemente de la presión aplicada, mediante el test de correlación con un nivel de confianza del 95%.

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

1.1. Antecedentes

Hoy en día los motores de inducción son las máquinas eléctricas más utilizadas a nivel industrial, principalmente por su sencilla construcción, reducido mantenimiento, buenas prestaciones y gran robustez. Por medio de estas máquinas rotativas es más conveniente obtener energía mecánica a partir de energía eléctrica. El motor de inducción consta de una parte fija, denominada estator y una parte giratoria denominada rotor, incorporado cada una de ellas por una serie de devanados formados con un conductor eléctrico y separadas por una capa de aire denominada entrehierro (Mora, 2016a: p.5).

En el ámbito industrial los motores de inducción son equipos fundamentales en todo proceso productivo, por lo cual debe mantenerse en condiciones de funcionamiento óptimo. El mantenimiento basado en la condición es una herramienta ampliamente difundida para evitar o reducir los paros imprevistos de máquinas, pérdidas de producción y dinero. Para determinar la condición de las máquinas eléctricas se han desarrollado algunas técnicas de diagnóstico, así como: método de eficiencia energética eléctrica, análisis de vibraciones y una combinación de ellas (Valencia, 2018a: p.31).

Durante el funcionamiento de los motores de inducción, la aparición de la excentricidad es otra de las causas más comunes de vibración, de los cuales se mencionan, defecto de fábrica, incorrecta instalación y manipulación, mal montaje y desgaste de los rodamientos, eje del rotor arqueado o fracturado, velocidad crítica que crea un giro del rotor, etc.

La excentricidad en los motores de inducción se presenta de tres formas, excentricidad estática, excentricidad dinámica y la excentricidad mixta (Burgueño et al., 2017: pp.6-7). Dado que la excentricidad estática es la parte mecánica donde la fuerza es constante y en una sola dirección, eso significa que el rotor está posicionado en el centro del orificio, pero ya no gira alrededor de su eje. Las causas de este tipo de excentricidad son la flexión del eje del rotor, el desgaste o desalineación de los cojinetes y la resonancia mecánica a velocidad crítica (Wissam et al., 2019a: p.1).

Tradicionalmente los métodos para detectar las fallas en los motores de inducción escaseaban, y lo más conveniente era realizar mantenimiento correctivo, en la actualidad gracias al avance

tecnológico en el campo de mantenimiento basado en la condición se han desarrollado equipos especiales para la detección de fallas. Por ello todo ingeniero de mantenimiento deberá conocer sobre estas tecnologías predictivas, que conjuntamente con un software sea capaz de detectar cualquier tipo de falla de estas máquinas eléctricas, llegando a un diagnóstico eficaz mediante el cual se establezca las tareas de mantenimiento más adecuadas y económicas.

1.2. Planteamiento del problema

Muchas empresas o industrias necesitan profesionales capaces de solucionar problemas, realizar cambios, contribuir y satisfacer a todas las necesidades en el área del mantenimiento, no hay duda que la mayoría de las empresas no cuentan con un personal capacitado, entonces quién más que un ingeniero de mantenimiento industrial que garantice la mayor disponibilidad de la maquinaria industrial y resuelva eficaz y eficientemente el problema detectado.

Los conocimientos y prácticas de los estudiantes se generan en los laboratorios, mismos que deben estar equipados con módulos de prueba e instrumentos adecuados para un óptimo aprendizaje del diagnóstico vibracional de la excentricidad estática de un motor de inducción. En vista de que la Facultad de Mecánica no posee de dichos equipos en el cual puedan experimentar conocimientos de alto valor práctico y técnico que son necesarios para la formación de profesionales en Mantenimiento Industrial.

Al origen de este problema se genera un bajo desempeño y conocimiento defectuoso para detectar las fallas más habituales dentro del ámbito industrial, causando grandes costos de mantenimiento. Por ello se ha visto importante la construcción y el ensamble del módulo de prueba de la excentricidad estática mediante vibración, que garantice una mejor combinación entre lo teórico y lo práctico.

1.3. Justificación y actualidad

El rendimiento de los motores de inducción por lo general depende del mantenimiento basado en la condición, donde el análisis vibracional y la eficiencia energética ayudan a mejorar el desempeño de estos motores sin que se requiera apagar la máquina, por lo que estas actividades no generan pérdidas de producción. El diagnóstico vibracional de la excentricidad estática de un motor de inducción es una técnica mediante la cual se podrá obtener mediciones físicas de vibración para determinar los distintos modos de fallas.

Debido a que la mayoría de las máquinas funcionan con motores de inducción, en el cual se producen una gran cantidad de fallas. Por estos motivos las empresas buscan profesionales con conocimientos sólidos encaminadas a prevenir las fallas catastróficas de las máquinas rotativas.

Con la formación de un ingeniero de mantenimiento en el tema de diagnóstico de la excentricidad estática de un motor de inducción, facilita la identificación de las fallas más comunes, así como, las excentricidades en el entrehierro, barras rotas de los rotores y aislamiento de los devanados causados por efectos mecánicos, magnéticos y térmicos (Herrera, 2018a: p.1). Por ello es importante que un ingeniero de mantenimiento sea capaz de escoger un método más efectivo y solucionar todos los problemas de mantenimiento de una industria deprimida.

Los estudios se realizarán en los laboratorios de Diagnóstico Técnico de la ESPOCH, ubicado en la provincia de Chimborazo del cantón Riobamba, con el propósito de formar profesionales en la carrera de Mantenimiento Industrial que trabajen con las más recientes tecnologías de mantenimiento de maquinarias. La actividad principal que se desarrollan en estos laboratorios es simular un entorno de trabajo casi idéntico a la que se desarrolla dentro de la industria, de tal forma que los estudiantes puedan experimentar, practicar y aprender técnicas de detección de fallas.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Implementar un módulo de simulación para el diagnóstico vibracional de la excentricidad estática de un motor de inducción para el Rotor Kit del laboratorio de diagnóstico técnico y eficiencia energética de la facultad de mecánica de la ESPOCH.

1.4.2. Objetivos específicos

Seleccionar con criterios de diseño los componentes necesarios para el módulo.

Construir un módulo de simulación para el diagnóstico vibracional de la excentricidad estática en la bomba.

Determinar las frecuencias naturales para examinar el estado de funcionamiento de las bombas periféricas.

Verificar que el armónico correspondiente al doble de la frecuencia de línea permanezca constante a medida que la carga del motor varía.

Elaborar la guía de práctica de laboratorio, el manual y el plan de mantenimiento para el módulo de simulación del diagnóstico vibracional de la excentricidad estática.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Máquinas rotativas

Una máquina eléctrica es un dispositivo que transforma energía mecánica en energía eléctrica o energía eléctrica en energía mecánica. Cuando este dispositivo se utiliza para convertir energía mecánica en energía eléctrica se denomina generador, y cuando convierte energía eléctrica en energía mecánica se llama motor (Chapman, 2012, p.20).

En efecto, comprendemos por máquina eléctrica rotativa a un sistema electromagnético que consta de circuitos magnéticos y eléctricos interrelacionados mutuamente, con la capacidad de transformar, generar y aprovechar la energía eléctrica. Siendo las máquinas más utilizadas aquellas en las cuales la parte móvil o rotor gira variando su posición angular respecto a la parte inmóvil o estator, debido a esto se les conoce como máquinas giratorias o rotativas.

Podemos mencionar las partes principales de una máquina rotativa, siendo estas la parte estacionaria o estator, la parte móvil o rotor separados por un espacio de aire denominado entrehierro aproximadamente de 1mm a 1,5mm tal cual se observa en la figura 1-2.

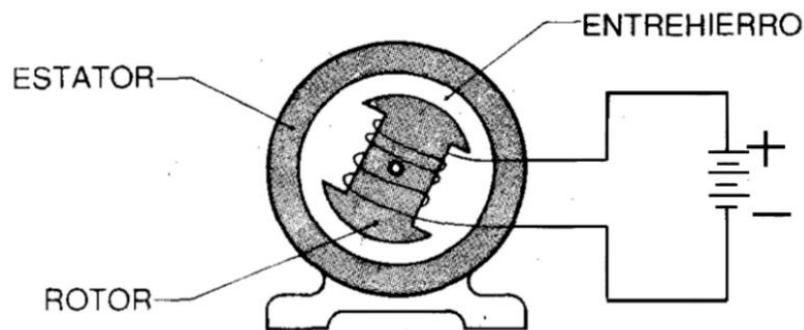


Figura 1-2: Constitución de una máquina eléctrica rotativa

Fuente: Machuca, 1990

2.2. Motor de inducción

Motor de inducción es una máquina eléctrica basada en la acción electromagnética entre un campo magnético giratorio que induce el movimiento de rotación y una corriente inducida en un

devanado por este mismo campo (Allauca y Paguay, 2019: pp.11-12). Si bien es cierto, es uno de los motores más usados, económicos, de fácil construcción, un buen rendimiento, y de gran aceptación en la maquinaria industrial. Estos motores no necesitan escobillas ni colectores, conmutador ni anillo de contacto, esto hace que el mantenimiento sea más sencillo.



Figura 2-2: Motor asíncrono de inducción

Fuente: SIEMENS, 2019

2.2.1. Componentes externos e internos del motor de inducción

Básicamente el motor de inducción consiste en un estator, rotor y dos tapas en los extremos que alojan los cojinetes que sostienen el eje del rotor (Keljik, 2011, p.104). En particular, los principales componentes de un motor de inducción se describen en la figura 3-2, donde toda máquina eléctrica rotativa consta de circuitos magnéticos, circuitos eléctricos y soportes mecánicos.

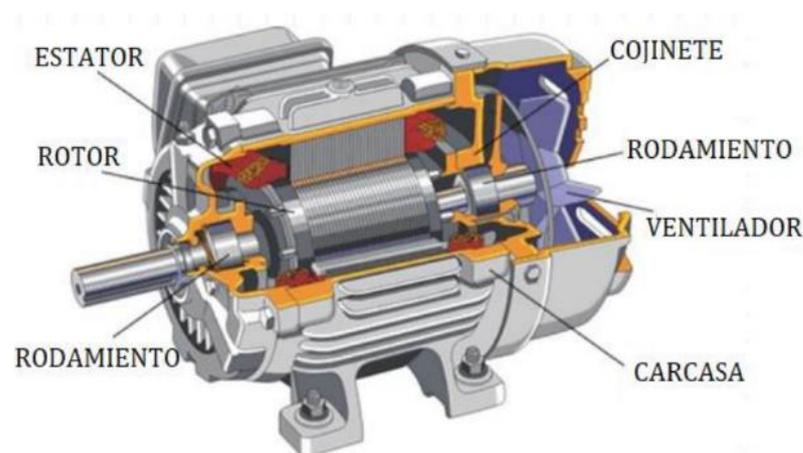


Figura 3-2: Vista en corte y partes de un motor de inducción

Fuente: Herrera, 2018

2.3. Entrehierro

De acuerdo con The Electro-Mechanical Authority (EASA), en máquinas AC el entrehierro es el espacio de aire entre los núcleos del rotor y el estator, mientras que para una máquina DC se dice que es el espacio entre los interpolos y la armadura (Rivero, 2020, p.15).

Vale mencionar, que el espacio de aire (entrehierro) que existe entre la parte fija o estator y la parte móvil o rotor es mínima, en concreto esta separación en los motores asíncronos o de inducción es mucho menor que la de generadores.

2.4. El motor de inducción en la industria

El motor de inducción o motor asíncrono es uno de los activos más importantes que tiene la industria en la actualidad, los cuales son ampliamente utilizado debido a su bajo costo y fácil operación. Otras de las razones más relevantes son: por su gran disponibilidad, excelente confiabilidad y de alto rendimiento. Este tipo de motor aun siendo muy seguro y fiable necesita un mantenimiento para alargar su vida útil y su buen funcionamiento (Contreras, 2020, p.10).

Estos motores se utilizan en bombas centrífugas de impulsión, ventiladores, compresores, sopladores, cintas transportadoras, máquinas herramientas, trituradores y varias otras aplicaciones en procesos industriales. Por lo cual, en un motor de inducción la velocidad está determinada por el número de polos magnéticos en el motor y la frecuencia sinusoidal alterna de la energía eléctrica suministrada al motor.

Debido al uso general de los motores de inducción, dentro de la industria es extremadamente susceptible a fallas, lo que genera pérdidas de costos cuando se detiene la producción. Las grandes y medianas industrias deben realizar un mantenimiento predictivo y preventivo en los motores eléctricos para evitar o reducir las paradas imprevistas, costos de sustitución. Por lo tanto, es importante tener un método de detección de fallas y de esta manera monitorear los parámetros operativos del motor.

2.5. Fallas en el motor de inducción

Según las encuestas realizadas en la cuarta Conferencia Internacional sobre Electrónica de Potencia y sus Aplicaciones (ICPEA), del septiembre 2019, Turquía, el porcentaje de falla por los elementos constitutivos de los motores de inducción relacionado con el estator (38%); relacionado con el rotor (10%); relacionado con el rodamiento (40%) y otros (12%) (Wissam et al., 2019b: p.2).

Pese a que, los motores de inducción son robustos y de construcción sencilla están expuestos a una diversidad de fallas, claramente se observa lo expuesto en el párrafo anterior mediante la siguiente figura 4-2.

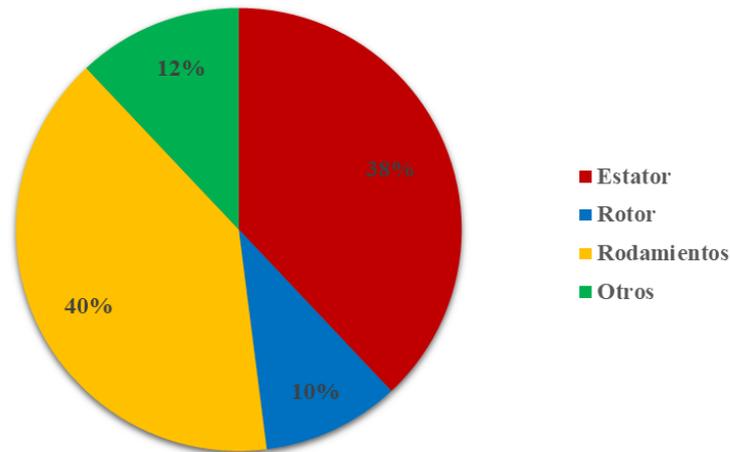


Figura 4-2: Fallas en motores de inducción clasificada por pieza

Fuente: Burgueño, 2017

A continuación, se describen las fallas que reducen el rendimiento del motor de inducción según el orden de incidencia.

2.5.1. *Fallas en rodamientos*

Las fallas en los rodamientos son las más comunes en los motores, se manifiestan por vibraciones de alta frecuencia, que pueden ser de hasta 12X, sin embargo, a medida que el daño es mayor las frecuencias van disminuyendo (Valencia, 2018b: p.9).

Sobre todo, es necesario mencionar que debido a la fricción a la que están sometidos, los rodamientos sufren más deterioro en un motor de inducción, que una vez detectada la falla debe ser remplazada para que la dicha falla deje de incrementarse. Entre las causas comunes de fallas en los rodamientos podemos encontrar a: Carga excesiva, desbalance en la carga, defectos en la instalación, excentricidad del rotor, falta de lubricación (Martinez y Dix , 2017: p.18).

2.5.2. *Fallas en el estator*

Los fallos en el estator tienen tendencia a producirse en un mismo elemento que es el aislamiento eléctrico del bobinado trifásico debido al efecto de diversos factores como los factores eléctricos, mecánicos, térmicos, medioambientales, etc. (Fernández, 2018, p.33).

Es necesario recalcar que una de las fallas que ocurren con mayor frecuencia en el estator es el cortocircuito en las espiras debido a que el bobinado se encuentra a altas temperaturas y a vibraciones constantemente, dicho lo anterior, para detectar la falla es monitorear la máquina y prevenir que la falla se incremente. En la tabla 1-2., encontramos los tipos de fallas más frecuentes y sus consecuencias en el devanado del estator.

Tabla 1-2: Fallos más habituales en el devanado del estator

Tipo de fallo	Consecuencia
Cortocircuito entre espiras.	El motor puede seguir en servicio por un tiempo límite.
Cortocircuito entre bobinas de la misma fase.	El motor puede seguir en servicio por un tiempo límite.
Cortocircuito entre fases.	Fallo del motor. El sistema de protección se activa y desconecta el motor.
Derivación de fase a masa.	Fallo del motor. El sistema de protección se activa y desconecta el motor.
Circuito abierto en una fase.	El motor puede seguir en funcionamiento dependiendo de la carga y del circuito de protección.

Fuente: Fernández, 2018.

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022.

2.5.3. Otros tipos de fallas

Este tipo de fallas ocurre por la excentricidad cuando el entrehierro no es uniforme, en cuanto a esto el presente trabajo estudia el diagnóstico la excentricidad estática del motor de inducción.

2.5.4. Fallas en el rotor

Los problemas que existen en el rotor suelen mantener relación con las elevadas temperaturas que se alcanzan en el rotor y las elevadas cargas que se generan en el final de las barras, donde se conectan con el anillo del cortocircuito (Granados, 2017, p.21).

En realidad, la falla más común en el rotor es el agrietamiento, el calentamiento y la rotura de barras especialmente en motores grandes que arrancan frecuentemente bajo carga. Para lograr prevenir estas fallas se puede estudiar una serie de señales del motor tal cual se mencionan en la tabla 2-2.

Tabla 2-2: Principales señales estudiadas para prevenir fallas en el rotor

Señales mencionadas	Descripción
Corriente de estator	La medición de corriente permite conocer el espectro en frecuencia de la misma, utilizado para detectar distintas fallas como: barras rotas, cortocircuitos entre espiras del estator y excentricidad
Vibraciones	La medición de vibraciones se utiliza para localizar fallas de origen mecánico como desbalances mecánicos y problemas con los rodamientos.
Flujo magnético axial	Al medir el flujo magnético axial (con una bobina circular conectada en el extremo del motor) se obtiene una señal que está compuesta por varias componentes de frecuencia que se encuentran también en las corrientes estatóricas. Es una señal que brinda información para determinar la velocidad.

Fuente: Burgueño, 2017.

Realizado por: Paca J; Gamarra D. 2022.

2.6. Vibraciones en el motor de inducción

A largo de los años, al contacto directo o con el empleo de determinados equipos de naturaleza subjetiva, los operadores de máquinas y/o motores han utilizado método de verificación auditiva también de manera subjetivas, para comprobar si el comportamiento de “su máquina” es normal o no. Por lo tanto, tradicionalmente, quizás inconscientemente, las vibraciones han utilizado como un indicador del estado técnico de los motores de inducción hasta hoy en día continúen siendo los fenómenos más representativos de estos estados técnicos.

Las vibraciones en un motor de inducción se pueden medir, mientras que la fallas se pueden detectar e identificar en un periodo de desarrollo prematuro. Así pues, las magnitudes de vibración están dadas por la frecuencia y la amplitud, en tanto las unidades son la velocidad o el desplazamiento y la aceleración, resultando esta última como el parámetro más utilizado en unidades de m/s^2 (Garfias, 2021, pp.31-32).

2.7. Excentricidad

La excentricidad es un tipo de falla del motor causada por un espacio de aire no uniforme entre el orificio del estator y el rotor. Debido a la presencia de ésta, aumenta los niveles de vibración en

dirección axial y radial; que de no ser corregido a tiempo puede causar un movimiento excesivo del devanado del estator, resultando en un aumento en la fricción, posible falla entre espiras, el desgaste de los rodamientos, mayor desviación del eje, dando como resultado la fricción entre el rotor y estator generando la pérdida eficiencia y eficacia del motor (Chungwei et al., 2021: p.1).

Además, la no uniformidad del entrehierro trae un valor de reluctancia variable, que genera armónicos en el campo magnético. Las causas más comunes de excentricidad en un motor de inducción son: por defecto de fábrica, incorrecta instalación y manipulación, mal montaje y desgaste de los rodamientos, eje del rotor arqueado o fracturado, velocidad crítica que crea un giro del rotor, etc.

2.8. Tipos de excentricidad

La falla de la excentricidad se divide en cuatro casos que son: excentricidad estática, dinámica, mixta y axial. Pero en realidad existen de dos tipos, la excentricidad estática, excentricidad dinámica y una combinación entre ellas conocida como excentricidad mixta. A continuación, se detallan de forma clara los tipos de excentricidad en los motores de inducción (Herrera, 2018b: p.20).

2.8.1. *Excentricidad estática*

La excentricidad estática se presenta cuando existe una distorsión en el tamaño del entrehierro, en la cual el valor mínimo de éste se encuentra en una posición fija en el espacio. Se ha destacado que la distorsión puede ser causada por la ovalidad del alojamiento estatórico o por un incorrecto posicionamiento del rotor dentro del estator, este último es causado por; los cojinetes desgastados, mal apoyo en cojinetes mal formación de los alojamientos, excesiva tolerancia, etc. (Herrera, 2018c: p.20).

De manera sencilla, la excentricidad estática es un tipo de falla mecánica donde el eje de giro del rotor no coincide con el centro geométrico del estator, pero si con el del rotor sobre todo girando alrededor de su propio centro. Es importante destacar, la excentricidad estática es cuando los ejes del rotor y del estator están desalineados en forma paralela.

Para ilustrar mejor este tipo de excentricidad, en la figura 5-2 se muestra un corte transversal donde se aprecia el estator y el rotor, mientras que en la figura 6-2 se observa las formas de producirse la excentricidad estática.

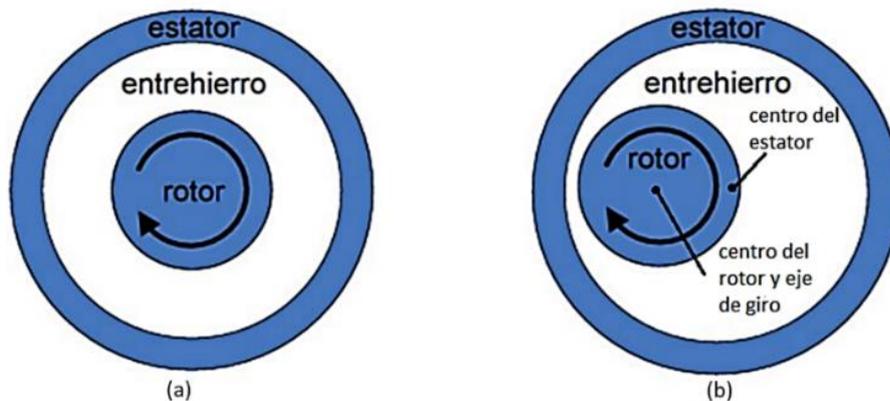


Figura 5-2: Motor sin excentricidad (a), Motor con excentricidad estática (b)

Fuente: Burgueño, 2017

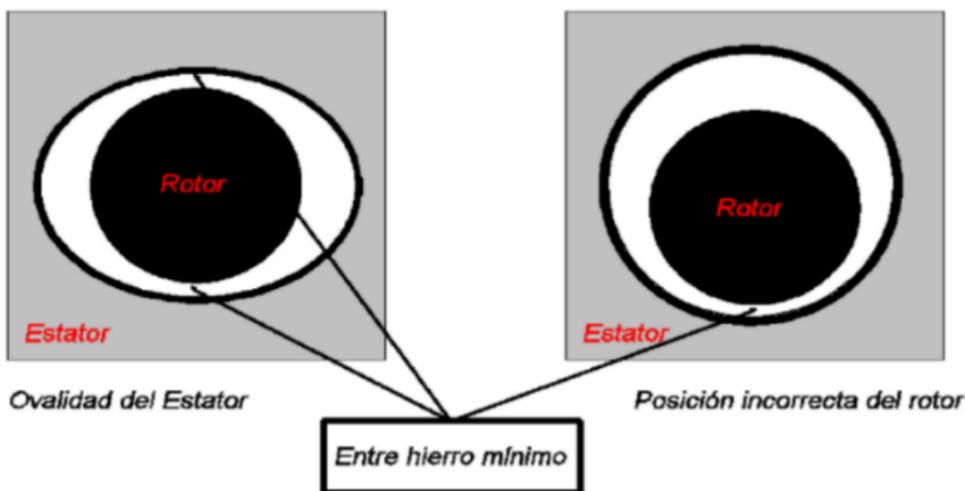


Figura 6-2: Forma de producirse la excentricidad estática

Fuente: Valencia, 2018

2.8.1.1. Excentricidad en el estator

Esto hace referencia a la distribución no uniforme y estacionaria del espacio entre el rotor y el estator, este defecto produce grandes amplitudes a la segunda armónica de la frecuencia de línea. Además, las vibraciones son altamente direccionales, orientadas de acuerdo con la posición del área más estrecha, porque la mayor fuerza magnética se genera en área donde rotor y estator están más cerca (Palomino, 2007a: p.147).

La causa fundamental de este defecto radica no sólo en los posibles defectos que pueda haber tenido en el enrollado del motor durante ciertos procesos de mantenimiento, sino también, en la

deformación de la estructura interna del motor que puede ser provocada por caídas e impactos, a la presencia de la “pata coja” o al cojinete del rotor mal alineados.

Según las Cartas de Charlotte menciona a la excentricidad estática como; excentricidad del estator, laminación en cortocircuito o estator suelto. Por tanto, los problemas en el estator generan una alta vibración a $2X$ la frecuencia de la línea eléctrica ($2F_L$).

La excentricidad del estator produce un entrehierro irregular estacionario entre el rotor y el estator, lo cual produce una vibración muy direccional. El entrehierro no debe exceder más del 5% para motores de inducción y el 10% para motores sincrónicos. Las patas suaves y las bases torcidas pueden dar como resultado un estator excéntrico. El estator suelto a su carcasa se debe a una holgura o debilidad en el soporte del estator. Las laminaciones del estator con cortocircuito pueden causar un calentamiento irregular, el cual puede distorsionar al estator en sí. Esto produce una vibración inducida por efectos térmicos que puede incrementarse significativamente con el tiempo de operación, causando una distorsión en el estator y problemas en el entrehierro (Charlotte, 1996, p.4).

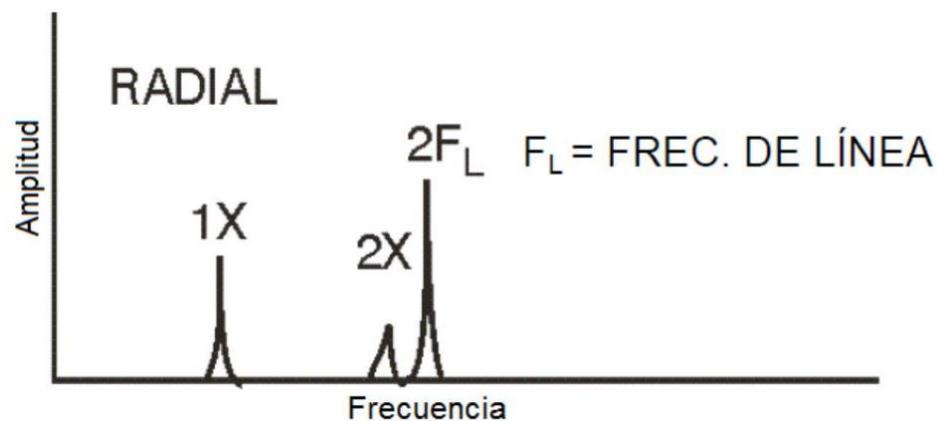


Figura 7-2: Espectro referencial de la excentricidad estática

Fuente: Charlotte, 1996, p.4

2.8.2. *Excentricidad dinámica*

La excentricidad dinámica se da cuando la distancia mínima entre el rotor y estator no permanece fija en una posición, si no que va girando de forma solidaria con el rotor. La causa de este comportamiento puede ser la ovalidad del rotor, o debido a que el centro de giro del rotor no sea el centro geométrico de rotación que es causado por; cojinetes desgastados, flexión del eje, mal formaciones en el paquete magnético del rotor, etc. (Herrera, 2018d: p.22).

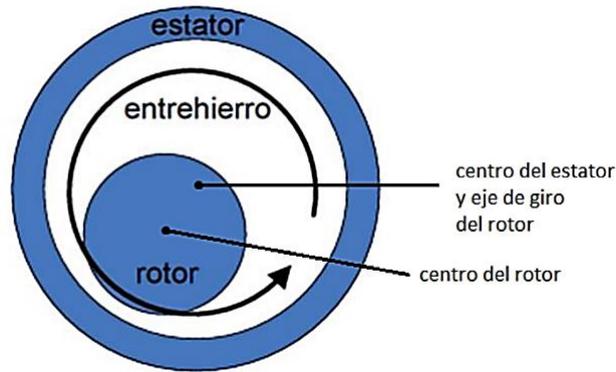


Figura 8-2: Motor con excentricidad dinámica

Fuente: Burgueño, 2017

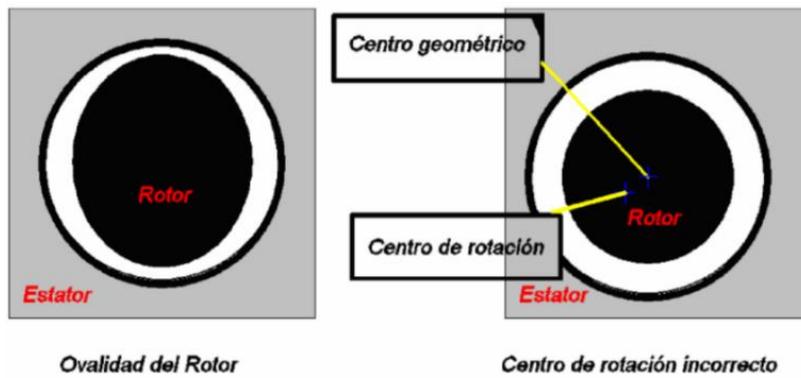


Figura 9-2: Forma de producirse la excentricidad estática

Fuente: Valencia, 2018

Conviene subrayar, que en el caso de la excentricidad dinámica en dicha falla el eje de giro del rotor coincide con el centro geométrico del estator, pero no con el del rotor. El anterior concepto sobre la excentricidad dinámica se aclara en la figura 8-2 y en la figura 9-2 la forma de cómo se produce la misma.

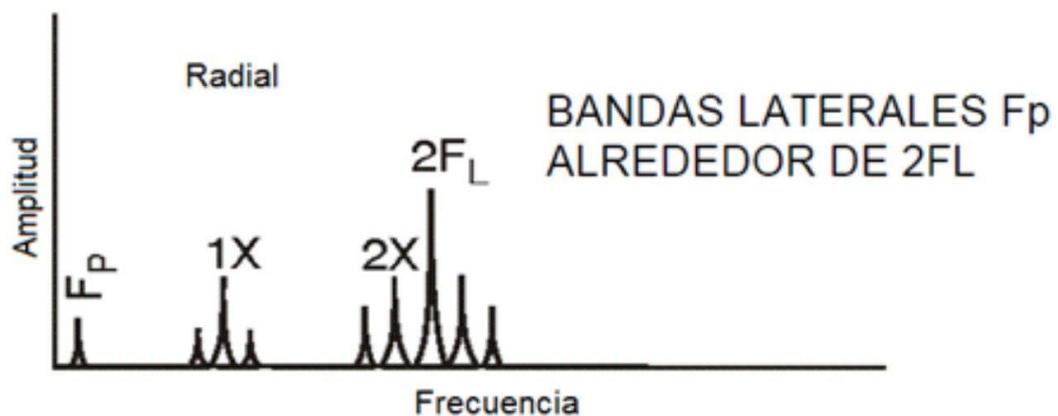


Figura 10-2: Espectro por falla de la excentricidad dinámica

Fuente: Daza, 2007

La excentricidad dinámica en el espectro se generará una componente a la 1x por el desbalanceamiento que genera, pero esta frecuencia estará modulada, y por ende presentará bandas laterales de dos veces la frecuencia de deslizamiento, las que también pueden estar presentes a la frecuencia de 2x de la frecuencia de línea (Daza, 2007a: p.99), como se indica en la figura 10-2.

2.8.2.1. *Excentricidad en el rotor*

Cuando la excentricidad tiene lugar en el rotor, ésta no es concéntrica con su propio eje de rotación. Esto también conducirá a un lugar de distribución no uniforme del espacio entre el rotor y el estator, pero en este caso, esta no uniformidad no es estacionaria, sino que se traslada conjuntamente con la rotación del rotor. De manera similar, en este caso, se produce una alta vibración en el segundo armónico de la frecuencia de línea, pero con bandas transversales separadas por la frecuencia de paso de los polos del motor (Palomino, 2007b: p.147).

Cabe señalar que, debido al aumento de temperatura, los motores de inducción con su rotor excéntrico, aumentarán sus niveles de vibración con el paso del tiempo operación. Observe la tabla 3-2.

Tabla 3-2: Relación tiempo – vibraciones

Tiempo [min]	Vibraciones [mm/s]
Arranque	2,5
10	3,5
20	4,6
30	6,35

Fuente: Palomino, 2007.

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022.

2.8.3. *Excentricidad mixta*

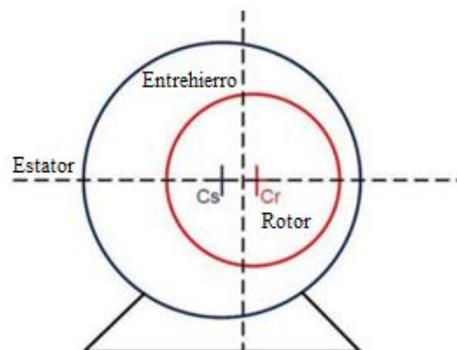


Figura 11-2: Excentricidad mixta

Fuente: García, 2017

En este tipo de excentricidad, el centro de rotación no coincide, ni con el centro geométrico del estator, ni con el centro geométrico del rotor (García, 2017, pp.54-55). Es por esto que se relaciona como la combinación de las dos anteriores. Conforme a lo dicho lo podemos apreciar en la figura 11-2 como tal.

2.9. Coeficiente de correlación de Pearson

El coeficiente de correlación de Pearson es una medida considerablemente utilizada en diversas áreas del quehacer científico, desde estudios técnicos, econométricos o de ingeniería; hasta investigaciones relacionadas con las ciencias sociales, del comportamiento o de la salud (Lalinde et al., 2018: p.1)

Una forma de cuantificar la relación entre dos variables es usar el coeficiente de correlación de Pearson, que es una medida de la asociación lineal entre dos variables y tiene un rango definido entre -1 y 1. Esto muestra que cuando r, es cero no hay correlación lineal, cuando es uno indica una correlación lineal perfectamente positiva y cuando es menos uno indica una correlación lineal perfectamente negativa entre las dos variables.

Para determinar si un coeficiente de correlación es estadísticamente significativo, se puede realizar una prueba de correlación que consiste en calcular las puntuaciones t y sus respectivos valores p. El valor p se calcula como el valor p de dos lados correspondiente para la distribución t con n-2 grados de libertad (Estatologos, 2022, p.7).

La fórmula para calcular la puntuación t es:

$$t=r\sqrt{(n-2)/(1-r^2)} \quad (1)$$

Dónde:

r: coeficiente de correlación

n: el tamaño de la muestra

2.10. Transformada rápida de Fourier

El núcleo de análisis de señales y el de análisis de sistemas es el análisis por Fourier de señales discretas. Su soporte matemático está respaldado por las siguientes relaciones:

$$A(k)=\frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1}a(n) \cdot e^{\frac{2\pi kn}{N}} \quad (2)$$

$$a(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} A(k) \cdot e^{\frac{2\pi kn}{N}} \quad (3)$$

Para $n = 0, 1, \dots, N-1$; $k = 0, 1, \dots, N-1$

Siendo N el número de muestras discretas de un segmento de la señal vibroacústica. A este conjunto de N muestras discretas se le denominará segmento. Las vibraciones como señales a procesar, $a(n)$ es real y $A(k)$ es compleja (Palomino, 2007c: p. 92). A estas ecuaciones se conocen con el nombre de transformada discreta de Fourier (DFT) cuya aplicación a un segmento de N muestras, como se representa en la figura 12-2.

Ahora, la Transformación de Fourier, ya sea en forma discreta o en la propia FFT, producirá una “salida”, que es equivalente a aplicar de un número finito de filtros pasa – banda al registro temporal discretizado (Palomino, 2007d: p. 92).

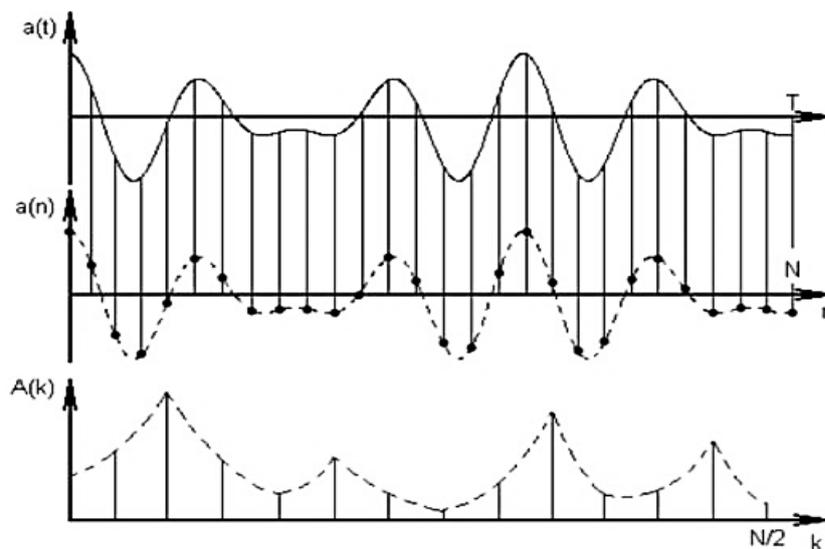


Figura 12-2: Discretización y transformación de un registro vibroacústico

Fuente: Palomino, 2007

2.11. Diagnóstico de máquinas eléctricas rotatorias empleando la FFT

En máquinas rotativas, cualesquiera de estos tipos de excentricidades tienen los mismos efectos sobre su funcionamiento:

- La aparición de armónicos de alta y baja frecuencia en el espectro de las corrientes del estator.

- Aparición de fuerzas pulsantes de origen eléctrico que darán lugar a vibraciones características.
- Incremento general de la vibración de la máquina.

El análisis en el dominio de la frecuencia de la señal de las corrientes del motor refleja claramente el efecto de la excentricidad, porque este análisis permite la detección de cambios en las señales con amplitudes muy pequeñas (Mora, 2016b: p. 22). Para este análisis en el dominio de la frecuencia, se utiliza la FFT, que es un algoritmo utilizado para el cálculo aproximado de la transformada discreta de Fourier.

Esta técnica se ha utilizado en el diagnóstico de motores durante muchos años para detectar fallas en el rotor mediante el análisis de las corrientes en el dominio de la frecuencia y los armónicos más analizados son los ubicados al lado de la frecuencia fundamental. Estas frecuencias se les denominan armónico lateral inferior f_i y superior f_s , y sus magnitudes están en función del grado de asimetría que presenta el rotor tipo jaula de ardilla (Mora, 2016c: p. 22). Esto se puede ver en la figura 13-2.

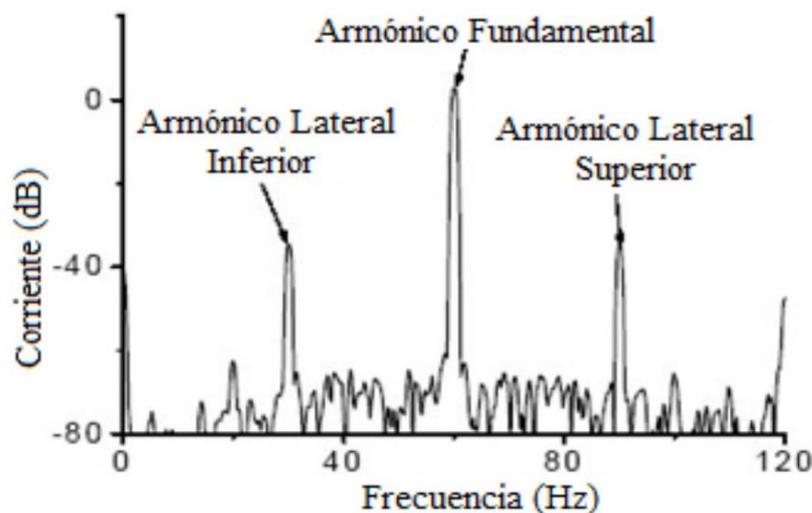


Figura 13-2: Armónicos laterales inferior y lateral superior de las corrientes

Fuente: Flores, 2011

2.12. Diagnóstico de la excentricidad estática

La falla de excentricidad estática generalmente aparece en las etapas de puesta en servicio y comienza como una falla de fabricación. Puede ser causado por una alineación incorrecta del eje o la ovalidad interna del estator. Sin embargo, se espera cierto nivel de excentricidad inherente, y esto se debe al muy pequeño espacio de aire entre los polos del rotor y los dientes del estator (Platero et al., 2019a: p.2).

El diagnóstico de máquinas eléctricas es parte fundamental de la monitorización, por lo que para el diagnóstico vibracional de la excentricidad estática de un motor de inducción para el Rotor Kit se tomará en cuenta estas dos técnicas de diagnósticos:

- Detección a través de análisis de corriente.
- Detección a través de análisis de vibraciones.

2.12.1. Detección a través de análisis de corriente

Es un complemento para el diagnóstico mediante vibraciones, ya que esta última tiene limitaciones al detectar problemas eléctricos en estado incipiente tales como excentricidades en el entrehierro, cortocircuitos entre vuelta-vuelta, en el devanado del estator y barras rotas en los rotores de los motores de inducción (Herrera, 2018e: p.37).

2.12.1.1. Análisis de la corriente del estator con excentricidad estática

Desde hace más de una década, esta técnica predictiva, conocida como análisis de señal de corriente del motor (MCSA) tiene una probada fiabilidad en la detección de problemas eléctricos. Utiliza como transductor una pinza amperimétrica que convierte la corriente de alimentación a milivoltios, para proceder al análisis de la transformada de fase de Fourier (FFT) con una resolución que permite separar la frecuencia de la red eléctrica de sus bandas laterales (Hernández, 2016, p.23).

Con esto quiero hacer mención que el análisis de señal corriente es una técnica usada para determinar condiciones de operación de los motores de inducción sin interrumpir la producción. Y con ello identificar los efectos producidos por cualquier tipo de excentricidad.

A continuación, presentamos los efectos más comunes detectadas sobre el funcionamiento del motor de inducción:

- Aparición de armónicos de alta y baja frecuencia en el espectro de las corrientes del estator.
- Aparición de fuerzas pulsantes de origen eléctrico que darán lugar a vibraciones características.
- Incremento general de la vibración de la máquina.

El análisis de la máquina de inducción se realiza con la presencia de las fallas de excentricidad puramente estáticas que se presentan en la figura 14-2 muestra el espectro de corriente del estator para un motor de inducción o asíncrono en buen estado y con una falla de excentricidad estática bajo carga ($s = 3,6\%$) (Wissam et al., 2019c: p.3).

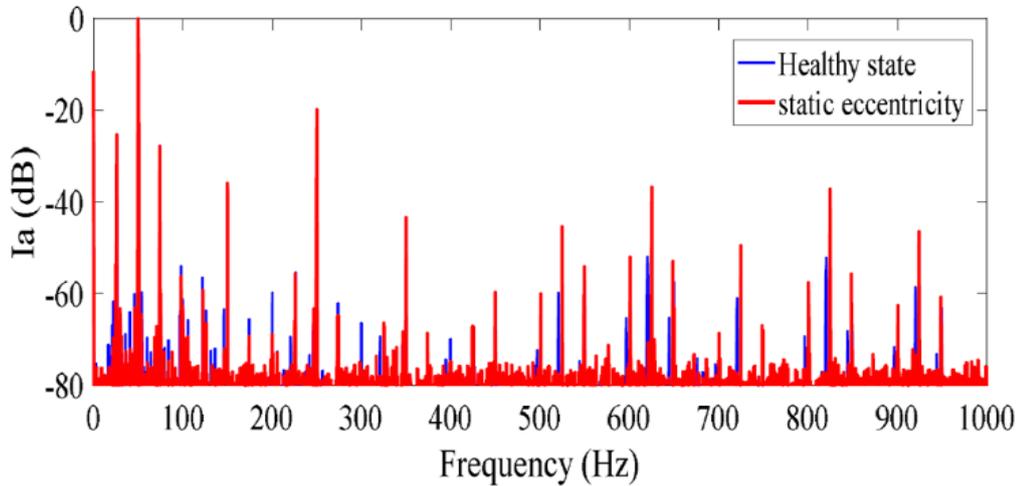


Figura 14-2: Espectro de la corriente del estator con un grado de excentricidad estática

Fuente: Wissam ,2019

Consideremos ahora, que en la figura 14-2 la parte azul me indica el estado saludable del motor y la parte roja el estado defectuoso del mismo, el mismo que se encuentra con el grado de excentricidad estática $d = 45\%$, 0-1000 Hz.

Frecuencia característica para espectro de corriente con excentricidad estática

La excentricidad estática no va a introducir ningún nuevo armónico de corriente, limitándose su presencia a incrementar la magnitud del armónico de ranura principal. La excentricidad estática solo se va a manifestar por la aparición de bandas laterales de los armónicos de ranura (Mora, 2016d: p.23).

$$f_{exc} = \left[(R \pm n_d) \frac{1-s}{p} \pm k \right] f_1 \quad (4)$$

Donde:

f_{exc} : Frecuencia característica de excentricidad estática (para espectro de corriente).

R: Número de ranuras del rotor.

n_d : Orden de excentricidad ($n_d=0$ para excentricidad estática).

s: Deslizamiento.

p: Número de pares de polos.

k: Orden del armónico de la fuerza magnetomotriz del estator ($k=0$ para excentricidad estática).

2.12.1.2. *Corriente de secuencia pseudo cero*

Es un método confiable para la detección de excentricidad estática en motores de inducción, además uno de los nuevos métodos para generadores síncronos trifásicos. La principal ventaja del método propuesto es su simplicidad y de bajo costo. La técnica se basa en el monitoreo de las corrientes trifásicas del motor en condiciones de rotor bloqueado para tres posiciones de rotor. Las señales monitoreadas se utilizan para calcular una forma de onda de pseudo-corriente de secuencia cero (ZSC). Se ha demostrado que los espectros de esta señal son una forma confiable de detectar no solo la falla de excentricidad estática sino también su nivel de severidad (Platero et al., 2019b: p.3).

Cuando una máquina eléctrica tiene excentricidad estática, entonces la posición irregular del rotor en el estator se fija en el espacio, creando así una asimetría de la reticencia del entrehierro que es solo espacial y no variable en el tiempo.

Además, esto significa que en cada instante un cierto polo saliente estará más cerca del núcleo de hierro del estator mientras que su polo saliente simétrico a 180° aparte tiene una distancia máxima del estator. Esta condición efectúa la distribución espacial del flujo magnético (Platero et al., 2019c: p.3).

Subsección de secuencia de pseudo cero

La idea principal detrás del método propuesto es que la irregularidad del entrehierro espacial causada por la excentricidad estática afecta espacialmente a la máquina eléctrica. Por lo tanto, se requieren más de un punto local de detección. Para este propósito, todas las corrientes trifásicas se monitorean en una posición específica del rotor mientras el rotor está bloqueado (Platero et al., 2019d: p.4).

2.12.2. *Detección a través del análisis de vibraciones*

El análisis de vibraciones es la técnica principal para monitorear y diagnosticar la maquinaria rotativa e implementar planes de mantenimiento predictivo. Mediante el análisis de vibraciones

se procesa resultados de forma exhaustiva los parámetros de supervisión y gráficos de diagnóstico, que se estudiará a continuación.

En cuanto al diagnóstico vibracional de la excentricidad estática en los motores de inducción para el rotor kit se toma como base la técnica de detección a través del análisis de vibraciones mecánicas, puesto que es una de las técnicas más fundamentales de monitoreo de condición en máquinas rotativas.

2.12.2.1. *Análisis de vibraciones mecánicas generadas por excentricidad estática*

Si la zona del entrehierro no es uniforme, las fuerzas sobre el rotor no están balanceadas, lo que puede provocar una alta vibración de inducción magnética de 120 Hz. La atracción magnética es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre el estator y el rotor, es decir, una pequeña excentricidad causara una vibración relativamente importante (Mora, 2016e: p.21).

Dado que las frecuencias, sobre todo en las bandas laterales de que se presentan en las frecuencias de línea y otras, se requiere un espectro con la mayor resolución en frecuencias posible (Daza, 2007b: p.98).

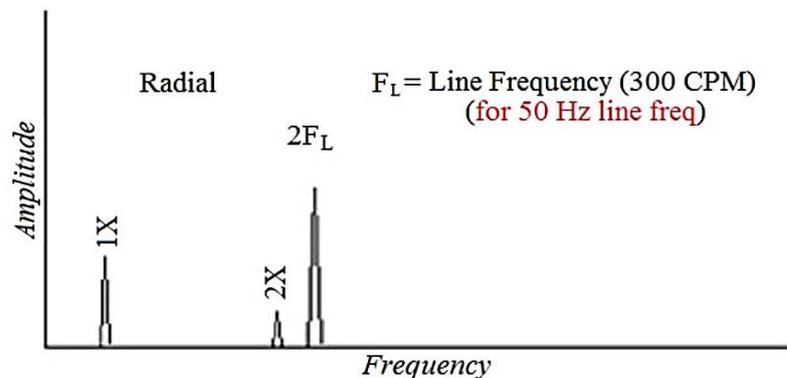


Figura 15-2: Espectro típico de la excentricidad estática

Fuente: Daza, 2007

2.12.2.2. *Análisis espectral de vibraciones con excentricidad estática.*

El uso de señal de vibración mecánica tiene un significado y una técnica de mantenimiento predictivo particularmente adecuada para máquinas rotativas. Cuando estas fallas están relacionadas con la excentricidad del estator, se pueden observar de diversas formas. Fallos del motor de inducción (Wissam et al., 2019d: p.4).

En las siguientes figuras, se muestra espectros de la corriente del estator con cierto grado de excentricidad estática $\delta d = 45\%$. En el espectro también, encontramos varios valores de los cuales causa una valiosa superposición y muestra la presencia de una línea $k \times f_r$ bandas laterales de excentricidad estática (Wissam et al., 2019e: p.5).

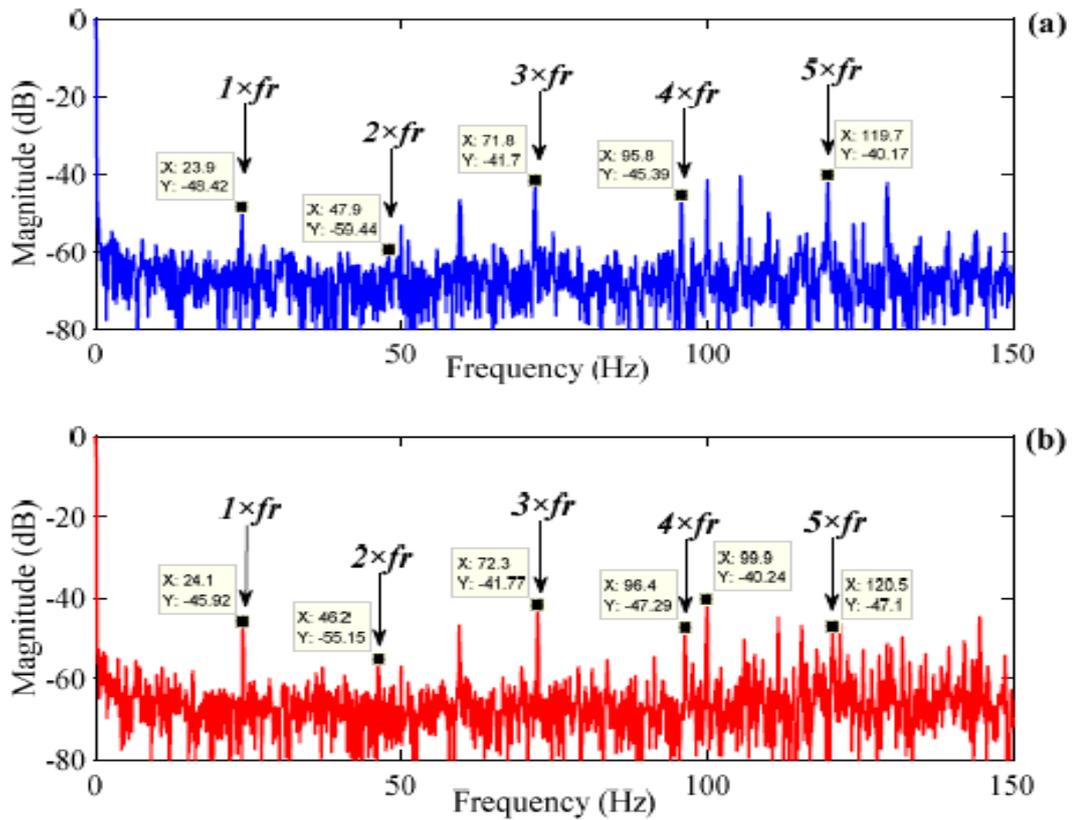


Figura 16-2: Espectro de la corriente del estator: (a) saludable y (b) excentricidad estática

Fuente: Wissam, 2019

CAPÍTULO III

3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL MÓDULO DE SIMULACIÓN

El diseño e implementación del módulo de simulación para el diagnóstico vibracional de la excentricidad estática del motor de inducción sigue una serie de pasos lógicos y físicamente compatibles entre los componentes del simulador, de modo que se pueden obtener los resultados satisfactorios de variables desarrollados durante el proceso de las pruebas y la recolección de datos, en consecuencia, este capítulo está aplicado al desarrollo explicativo, la construcción y adaptación a las condiciones.

3.1. Reconocimiento de equipos y herramientas

En esta sección, los equipos de protección personal es la fase primordial para la construcción del módulo de simulación para el diagnóstico vibracional de la excentricidad estática, dado que brinda el control de riesgos de seguridad y salud durante el diseño, construcción, montaje, instalación, ajuste, operación y mantenimiento. Sobre todo, por la situación actual que atraviesa el país y el mundo entero tomar todas las medidas de bioseguridad.

3.1.1. *Herramientas computacionales de diseño*

El módulo de simulación Rotor Kit se constituye de 4 bancos de pruebas, del cual se enfatizó en el módulo de simulación de la excentricidad estática del motor de inducción y como herramienta principal para el diseño, animación, despiece y elaboración de planos técnicos del dicho módulo se utilizó el software de diseño mecánico SolidWorks académico. Las distintas características y beneficios se detallan en la tabla 1-3.

3.1.2. *Herramientas computacionales de diagnóstico técnico*

La herramienta de diagnóstico técnico que se requiere para la implementación, análisis y adquisición de datos para el módulo de simulación se utilizó el software MAINTraQ Predictive que opera junto al Vibracheck, siendo este uno de los softwares más utilizados para el análisis vibracional. Al mismo tiempo evalúa máquinas espectralmente, registra los diagnósticos y mantenimiento realizados en cada equipo. En la tabla 2-3 se detallan las características y beneficios del dicho software.

Tabla 1-3: Hoja de resumen de SolidWorks Académico

SolidWorks® Académico	
<p>Información general Nombre: SOLIDWORKS Académico Desarrolladora: Dassault Systems SE Versión: 2020 Idioma: Español Campo de aplicación: Institución, Industria y Fabricación</p>	
Beneficios del software	
<p>SOLIDWORKS ofrece soluciones intuitivas para cada fase de diseño. Cuenta con un completo conjunto de herramientas que le ayudan a ser más eficaz y productivo en el desarrollo de sus productos en todos los pasos del proceso de diseño.</p> <p>La solución de SOLIDWORKS incluye cinco líneas de productos diferentes:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Herramientas de diseño para crear modelos y ensamblajes 2. Herramientas de diseño para la fabricación mecánica, que automatiza documentos de inspección y genera documentación sin planos 2D. 3. Herramientas de simulación para evaluar el diseño y garantizar que es el mejor posible 4. Herramientas que evalúan el impacto medioambiental del diseño durante su ciclo de vida. 5. Herramientas que reutilizan los datos de CAD en 3D para simplificar el modo en que las empresas crean, conservan y utilizan contenidos para la comunicación técnica. 	

Fuente: SolidWorks, 2020.

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022.

Tabla 2-3: Hoja de resumen de MAINTraQ Predictive

MAINTraQ® Predictive	
<p>Información general Nombre: MAINTraQ Predictive Desarrolladora: IDEAR CONDITION MONITORING Versión: 2020 Idioma: Español Campo de aplicación: Institución, Industria y Fabricación</p>	
Beneficios del software	
<p>MAINTraQ Predictive maneja rutas de máquinas que se miden secuencialmente con Vibracheck. De este modo, se facilita la planificación, disminuyen los tiempos de medición y aumenta la calidad de las inspecciones.</p> <p>CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Opera junto a Vibracheck • Planifica las inspecciones • Evalúa máquinas espectralmente y por valores globales de vibraciones • Muestra tendencias • Analiza vibraciones • Realiza estadísticas • Registra los diagnósticos y mantenimientos realizados en cada máquina • Genera informes 	

Fuente: MAINTraQ Predictive, 2020.

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022.

3.1.3. *Herramientas para la ejecución de mecanizado*

El módulo de simulación de la excentricidad estática de un motor de inducción para el Rotor Kit, está constituido por un conjunto de elementos a mecanizar. Entonces, a continuación, se detallan las siguientes máquinas, siendo estas las herramientas fundamentales para el proceso de mecanizado.

3.1.3.1. *Máquina rectificadora de superficie plana*

Es una máquina-herramienta que se usa para el mecanizado duro y fino de las piezas. Con ésta se pueden fabricar piezas con un acabado de dimensiones precisas, menor rugosidad y superficies de muy alta calidad.

Esta máquina se utiliza para rectificar la base de acero del módulo, debido a que se necesita una superficie estandarizada para que físicamente sea un complemento adecuado en el banco de pruebas.

3.1.3.1. *Taladro pedestal*

Se emplea un taladro de alta potencia que no solo permite realizar perforaciones, sino que también nos permite ranurar, avellanar, desbastar. Por ello se utiliza esta herramienta para realizar agujeros en las bases superior e inferior y en los elementos necesarios, con el fin de conseguir un correcto ajuste y montaje del módulo.

3.1.4. *Instrumentos de medición*

Los instrumentos de medición ayudan, generalmente a estandarizar las magnitudes de todos los elementos a utilizar en la construcción del módulo y que las mismas tengan medidas precisas y exactas. Las principales herramientas de medición empleados para llevar a cabo este módulo son:

- Flexómetro
- Calibrador
- Escuadra
- Regla de acero graduada
- Nivel de burbuja
- Falsa escuadra

3.1.5. *Máquinas y herramientas de construcción*

Para la construcción del módulo, no solo es tener la actitud de trabajar sino también tener conocimiento de cómo funciona cada uno de estos elementos. A continuación, se detallan las máquinas y herramientas empleadas para la construcción del mencionado módulo.

- Máquina de corte por plasma
- Tronzadora corta metal
- Soldadora especial MIG
- Macho de roscar

3.1.6. *Equipos y accesorios de acople*

El módulo de simulación se construye con un conjunto de equipos y accesorios confiables con todos los requerimientos necesarios que servirán como estudio para el análisis de la excentricidad estática de un motor de inducción y comprobar el buen funcionamiento y operación. Dicho esto, a continuación, se menciona el listado de equipos y accesorios utilizado en el módulo:

Tabla 3-3: Listado de equipos y accesorios para el módulo de excentricidad estática

Cantidad	Detalle
4	Bombas periféricas 0,5 Hp
4	Recipiente 2 Gal.
2	Tubo cuadrado de 1"
8	Válvulas de esfera de 1"
8	Planchas de acero 320X320 mm
16	Codos PVC de 1"
1	Tubo PVC 1"
4	Manómetros de 0 a 85 Psi con rosca de 1/4"
8	Neplos perdidos 3/4" de PVC
8	Unión tipo T con reducción 1" a 1/2" en PVC
8	Unión universal PVC de 1"
4	Reducción de 1" a 3/4"
4	Unión roscada de 3/4" a 1"
5	Teflón
4	Permatex
8	Adaptador o brida roscable para tanque de agua de PVC de 3/4"
4	Bushing de PVC de 3/4" a 1/4"
8	Bushing de PVC de 1" a 3/4"

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022.

3.2. Determinación de los parámetros de operación del módulo de simulación

Una de las características principales del presente módulo de simulación, es la de establecer el funcionamiento óptimo de todas las partes constitutivas en función de los requerimientos de su operación, el mismo que debe simular un entorno de trabajo lo más cercano posible a la realidad desarrollada dentro de la industria. Y mediante la adquisición de equipos con características y datos generales de funcionamiento para cada prueba, análisis y adquisición de datos que permite el cumplimiento de este trabajo técnico.

3.2.1. Determinación de los parámetros del motor con excentricidad estática

Para la ejecución y análisis de las respectivas pruebas, se optó por bombas periféricas de 0.5 Hp de marca MILANO, con una succión y descarga nominal de 1 pulgada con la posibilidad de funcionar bajo ciertos criterios de operación.

En estas bombas el motor de inducción posee una excentricidad estática de forma permanente, por lo cual, la condición experimental para este módulo se desarrolla bajo distintas cargas mediante variación de la presión de la bomba estrangulando el flujo de descarga a través de una válvula de esfera. La finalidad de realizar este proceso de estudio es desarrollar un análisis del comportamiento de los armónicos de fallas fundamentales del motor en función de los cambios que se generará en la carga. En la tabla 4-3 representa las características básicas de las bombas periféricas para efectuar este estudio.

Tabla 4-3: Características de la bomba periférica

Datos	Descripción
Modelo	QB-60
Voltaje	110 V
Potencia	0.5 Hp
Frecuencia	60 Hz
Caudal máximo	40 l/min
Altura máxima	40 m
Revoluciones	3450 rpm

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022.

Indiscutiblemente, se utilizó un motor de inducción para el presente estudio denominado diagnóstico vibracional de la excentricidad estática puesto que la mayor parte de las máquinas industriales: tornos, fresadoras, envasadoras, grúas, compresores, bombas etc.; herramientas: taladros, amoladoras y máquinas en general emplean este tipo de motores.



Figura 1-3: Bomba periférica MILANO

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022

3.2.2. *Determinación de los parámetros de funcionamiento eléctrico de la bomba*

La bomba periférica es un equipo eléctrico. Es por ello que la instalación eléctrica debe ser casi perfecta, porque una falla o el mal funcionamiento en los conductores eléctricos traería dificultades y hasta puede llegar a provocar accidentes inevitables.

La selección del calibre del conductor que se utilizará para la instalación de la bomba periférica es importante para el buen funcionamiento y seguridad del conductor eléctrico, de los equipos de alimentación y del personal que interactuará con cierto módulo. A través de esta determinación de parámetros, evitaremos fallos y el deficiente funcionamiento en la bomba periférica.

Ahora bien, el criterio de selección del elemento conductor eléctrico para la línea de alimentación se realizó en función a la intensidad de la bomba, por ende, la intensidad se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$P_n = V_n \cdot I_n \quad (5)$$

Despejado la intensidad de la ecuación 4 tenemos:

$$I_n = \frac{P_n}{V_n}$$

Donde:

P_n : Potencia nominal.

V_n : Voltaje nominal

I_n :: Intensidad nominal

Como datos se tiene:

$$P_n = 0,37 \text{ kW}$$

$$V_n = 110 \text{ V}$$

Realizando los reemplazos se tiene:

$$I_n = \frac{370 \text{ W}}{110 \text{ V}}$$

$$I_n = 3,3636 \text{ A}$$

De acuerdo a los criterios expuestos en la tabla 5-3, se selecciona un cable conductor multipolar THHN/THWN-2 3X16 AWG, cuya corriente nominal es de 3,7 amperios y con una resistencia de 12,9 ohmios, estos rangos están dentro de la intensidad calculada anteriormente.

Tabla 5-3: Tabla de calibre de conductores AWG

Número AWG	Diámetro de mm	Sección en mm ²	Número de espiras x cm	kg. por kilómetro	Resistencia en Ω por km	Corriente en Amperios
0	8,252	53,48	-	-	0,317	150
1	7,348	42,41	-	375	0,40	120
2	6,544	33,63	-	295	0,40	96
3	5,827	26,67	-	237	0,63	78
4	5,189	21,15	-	188	0,80	60
5	4,621	16,67	-	149	1,01	48
6	4,115	13,3	-	118	1,27	38
7	3,665	10,55	-	94	1,70	30
8	3,264	8,36	-	74	2,03	24
9	2,906	6,63	-	58,9	2,56	19
10	2,588	5,26	-	46,8	3,23	15
11	2,305	4,17	-	32,1	4,07	12
12	2,053	3,31	-	29,4	5,13	9,5
13	1,828	2,63	-	23,3	6,49	7,5
14	1,628	2,08	5,6	18,5	8,17	6
15	1,45	1,65	6,4	14,7	10,30	4,8
16	1,291	1,31	7,2	11,6	12,9	3,7
17	1,150	1,04	8,4	9,26	16,34	3,2

Fuente: ELECTROCABLES C.A, 2018.

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022.

3.2.3. *Determinación de los parámetros del fluido*

El caudal y el flujo del fluido que pasa a través de los elementos y dispositivos mecánicos de transporte sin que genere los modos de fallas, como la corrosión, la cavitación en los álabes del impulsor los cuales provocan daños en los accesorios, en los componentes internos de la bomba y elementos acoplados en el módulo, por ello se selecciona el refrigerante automotriz con propiedades físicas y químicas especiales mediante cambios de presión y temperatura, el cual garantiza el funcionamiento óptimo y una vida útil a largo plazo.

El refrigerante automotriz viene a ser un fluido adecuado para este sistema, además de actuar como agente de enfriamiento, tiene una densidad similar al agua que fácilmente se puede simular el bombeo evitando sobrecalentamientos en conexiones y accesorios.

Las características y propiedades por los cuales se eligió este fluido se mencionan a continuación: no es tóxico, ni venenoso, fácil detección cuando existe fugas, previene la corrosión y cavitación, evita la formación de óxidos metálicos, no es perjudicial para el medio ambiente, tampoco es inflamable, reduce la creación de micro burbujas aislantes, sobre todo es un refrigerante seguro y económico.

Tabla 6-3: Especificaciones del fluido refrigerante

Líquido refrigerante	
Marca	Lubristone
Tipo	Distintivo
Densidad	1 g/cm ³
pH	8,5
Gravedad específica	1,002-1,006
Contenido	1 gal/3,79 L

Fuente: FREEZETONE, 2016.

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022.

3.2.4. *Determinación de componentes de transporte del fluido*

Dado que la entrada y salida nominal de la voluta son tuberías de carga y descarga de 1 pulgada, por lo que se ha seleccionado componentes de esta dimensión, los mismos que están detalladas en la tabla 3-3.

Los principales accesorios en el módulo de simulación, son los codos, uniones universales, válvulas de esfera y manómetros. En su mayoría de los accesorios mencionados anteriormente están hechas de material PVC, pero las válvulas de esfera están hecha a base de hierro galvanizado, mientras tanto el manómetro está hecho por elementos de cobre en su interior y externamente por una chapa metálica.

3.2.5. *Determinación de los requerimientos de carga*

La identificación de los equipos junto con sus características, especificaciones técnicas y funcionales, permite crear un sistema de bombeo cerrado en succión positiva para hacer una estimación general de carga, dicho sistema lleva a cumplir la función fundamental de bombear líquido refrigerante de un lugar a otro por medio de las líneas de conexión de carga y descarga correctamente ensambladas, acatando todos los parámetros de mantenibilidad, seguridad y control.

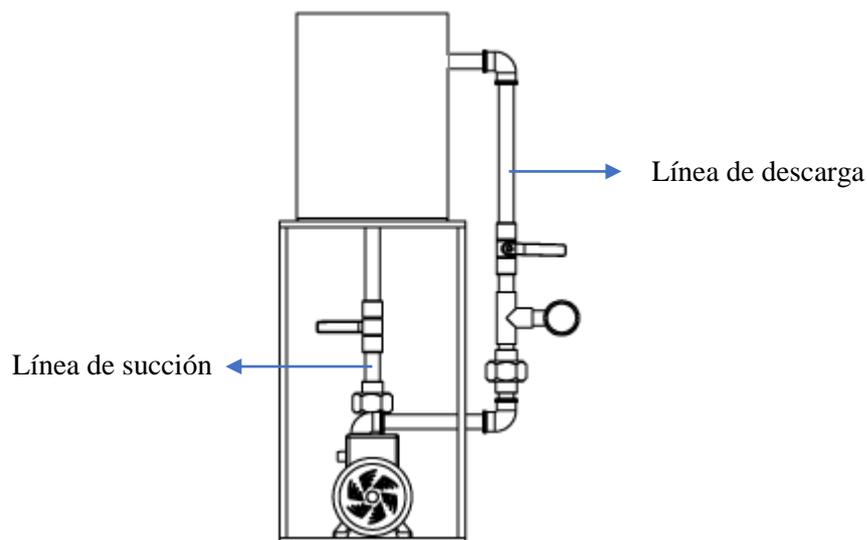


Figura 2-3: Vista lateral del módulo

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022

3.2.6. *Determinación de los parámetros del material para el soporte del módulo*

Los materiales utilizados para la construcción de la estructura deben soportar todo el peso de los elementos que constituye el módulo de simulación, por el cual debe brindar una suficiente resistencia, pero al mismo instante esto no represente excesivo peso. Por ello, se ha visto emplear tubo cuadrado con una medida nominal de 1 pulgada, que conjuntamente con las planchas de

acero se realiza una estructura de forma cúbica en la que todos los elementos constituyentes estarán correctamente ensambladas, como se muestra en la figura 5-3.

El material usado para las planchas superior e inferior del módulo es el acero SAE 1010, ya que contiene un bajo porcentaje de carbono y una muy buena soldabilidad. Cuyas propiedades mecánicas ayudan y garantizan a la construcción de la estructura para el soporte del módulo de manera resistente.

Tabla 7-3: Propiedades mecánicas del ACERO SAE 1010

SAE Y/O AISI	Procesamiento	Resistencia última MPa (kpsi)	Resistencia de fluencia MPa (kpsi)	Elongación en 2 in, (%)	Reducción en área (%)	Dureza Brinell
1010	HR	320 (47)	180 (26)	28	50	95
	CD	370 (53)	300 (44)	20	40	105

Fuente: Budynas, 2012.

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022.

3.3. Diseño y ensamble del módulo de simulación para el diagnóstico vibracional de la excentricidad estática

Luego de completar la determinación de los parámetros requeridos y seleccionar los materiales necesarios, en este apartado se detallarán los distintos diseños de las piezas que conformarán el módulo de simulación de la excentricidad estática. Los planos y las especificaciones de los distintos componentes se encuentran detallados en el anexo A.

3.3.1. *Diseño de la placa base del módulo*

La placa base es la parte fundamental de la estructura del módulo de simulación de la excentricidad estática, en donde serán ensamblados o montados todos aquellos elementos constitutivos, como la bomba periférica y accesorios de transporte del fluido. Dicha placa base debe contrarrestar vibraciones generadas por el funcionamiento de la bomba, misma que no debe afectar en la toma de datos y mediciones, por lo tanto, se diseña bajo criterio de estandarización, ya que ésta se debe acoplar a la mesa del Rotor Kit, (ver figura 3-3).

3.3.2. *Diseño de la placa superior del módulo*

La placa superior (figura 4-3) es un elemento primordial para la sujeción de accesorios de carga, descarga y el recipiente de 2 galones, el cual contiene el fluido mencionado anteriormente en el que se detalla en la tabla 6-3.

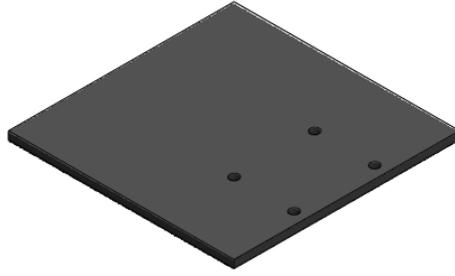


Figura 3-3: Vista isométrica de la placa base

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022

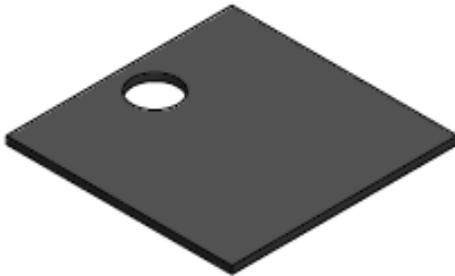


Figura 4-3: Vista isométrica de la placa superior

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022

3.3.3. *Diseño de la estructura de soporte*

Es una base tipo columna con cuatro apoyos verticales, cada uno de ellos ubicadas en los extremos de las planchas superior e inferior formando una figura cúbica rectangular, que sirve como base o chasis para el módulo de simulación, como se puede apreciar en la figura 5-3.

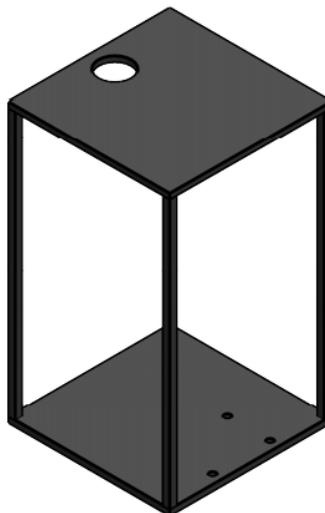


Figura 5-3: Vista isométrica de la placa superior

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022

3.3.4. *Modelado de la bomba periférica*

La bomba periférica es un sistema hidráulico que está diseñada para impulsar el fluido de un lugar a otro, a través de tuberías y accesorios con determinada presión y caudal. Dicho equipo se ensambla a la placa base del módulo de simulación.

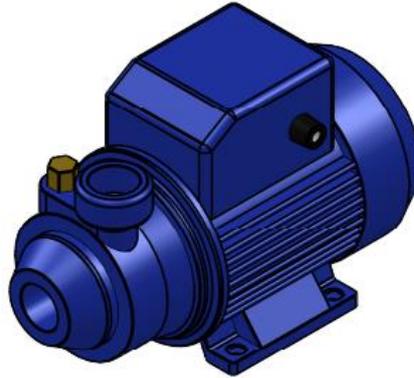


Figura 6-3: Vista isométrica de la bomba periférica

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022

3.3.5. *Modelado de tuberías y accesorios del módulo*

Es la parte esencial del módulo de simulación, ya que es la unión entre la bomba periférica y el recipiente de almacenamiento del fluido. El diseño de tuberías, neoplos, unión universal, unión tipo T y codos se establece mediante las medidas estandarizadas de 1 pulgada. Siendo éstas ensambladas en conjunto establecen una red de tubería, que serán de útil para la conducción y transporte del fluido.



Figura 7-3: Vista isométrica de la tubería

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022



Figura 8-3: Vista isométrica de la unión universal

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022



Figura 9-3: Vista isométrica de la válvula de esfera

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022

3.3.6. *Ensamblado general del módulo de simulación de excentricidad estática*

El paso final del diseño es conseguir el ensamble completo del módulo de simulación mediante la unión de piezas y elementos antes mencionadas, de manera ordenada y cronológica.

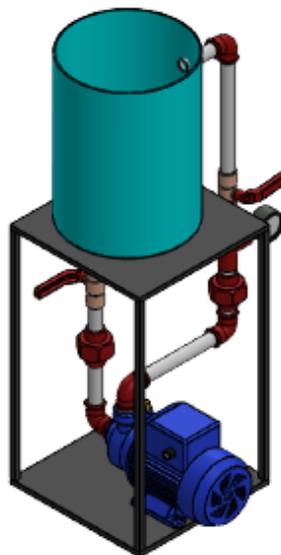


Figura 10-3: Vista isométrica del módulo ensamblado

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022

3.4. Construcción y montaje del módulo de simulación

Previo a la construcción es necesario conocer los principales comportamientos que evitan accidentes y sobre todo salvan vidas durante la realización del módulo:

- Pensar en seguridad
- Evaluar el riesgo
- Usar equipos de protección personal
- Observar las advertencias
- Usar herramientas adecuadas
- Orden y limpieza

Dicho lo anterior, se inicia con un mantenimiento preventivo aplicando aceite lubricante WD 40 a todos los materiales y accesorios con el fin de evitar la oxidación en los metales y contaminación en los equipos, tubos y accesorios PVC. Es muy importante este paso durante el proceso de construcción, ya que garantiza la durabilidad de la estructura y el conjunto de equipos acoplados al módulo de simulación.

Ahora bien, después del mantenimiento previo, el proceso para la construcción y montaje del módulo de simulación se toma como base principal las siguientes actividades que se mencionan a continuación en la figura 7-3.



Figura 11-3: Proceso de construcción del módulo de simulación

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022

3.4.1. *Adquisición de equipos y materiales*

Una vez establecidas los parámetros y requerimientos necesarios de cada uno de los componentes que conforman el módulo de simulación, en consecuencia, para la compra y adquisición de los equipos y materiales se debe tomar en cuenta la previa cotización con estándares de costo y efectividad.



Figura 12-3: Compra de materiales

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022

3.4.2. *Mecanizado de piezas metálicas*

El mecanizado de las piezas generalmente se realiza a partir de las medidas establecidas en la etapa de diseño (ver anexo A), utilizando máquinas, herramientas y materiales de calidad con el fin de obtener una elevada eficiencia en el acabado superficial, precisión dimensional y por consiguiente construir un módulo en perfectas condiciones de operación y funcionamiento.

Conviene subrayar, que el mecanizado de las piezas para el presente módulo se realiza con y sin arranque de viruta, es decir, por desprendimiento o eliminación del material, abrasión y corte respectivamente, con los cuales se obtiene excelentes resultados para llevar a cabo las actividades para la cual fue diseñada y construida. A continuación, en los siguientes apartados se detallan los procesos, operaciones y actividades realizadas.

3.4.2.1. *Corte de las piezas*

El proceso de corte se realiza de forma manual y mecánica para la producción de partes y piezas que conforman el módulo. Para la construcción de la estructura modular se realiza el corte de las planchas de acero AISI 1010 mediante autógeno cuyas medidas son de 34x34cm que posteriormente rectificadas se consiguen las dimensiones exactas de 32X32cm. Y los tubos o perfiles cuadrados de 1" se cortan por medio de la tronzadora para metal con las medidas de 55 cm de largo.



Figura 13-3: Proceso de corte de tubos cuadrados y planchas

Realizado por: Gamarra D; Paca J. 2022

3.4.2.2. *Rectificado de las piezas*

Este proceso se lleva a cabo en la máquina rectificadora, el cual se realiza mediante la operación de mecanizado por abrasión para darle forma con mayor precisión dimensional, excelente planitud y un acabado superficial acorde a los requerimientos, especialmente a las bases inferior y superior del módulo.



Figura 14-3: Rectificado de las planchas superior e inferior

Realizado por: Gamarra D; Paca J. 2022

3.4.2.3. *Perforaciones de las piezas según los requerimientos*

Para realizar esta operación, es preciso contar con brocas especiales para metal y es recomendable utilizar un líquido lubricante que facilite la perforación del material a partir de las medidas específicas donde se requiera la ubicación de equipos, dispositivos y elementos de sujeción para un montaje adecuado.

Algo muy importante que se debe tomar en cuenta en este proceso es siempre proteger los ojos de los pequeños fragmentos de metal que se desprenden al realizar las perforaciones requeridas

mediante un taladro pedestal. Además, se debe limar las perforaciones o agujeros para eliminar los bordes afilados y las rebabas presentes en las piezas.



Figura 15-3: Proceso de perforaciones

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022

3.4.3. *Soldadura de las piezas*

Esta operación se realiza mediante soldadura especial MIG, donde se procede a soldar las estructuras chasis o bases metálicas formando un elemento macizo y sólido que resiste las vibraciones y todo el montaje sobre dicho módulo. Es necesario eliminar el exceso de cordón de soldadura mediante el desbaste del material con la ayuda de una amoladora.

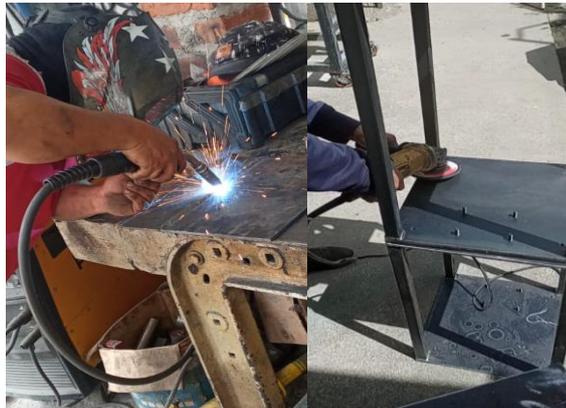


Figura 16-3: Proceso de soldadura y desbaste

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022

3.4.4. *Pintado de las piezas*

Para llevar a cabo este proceso se realiza previa limpieza de todas las superficies metálicas mediante la ayuda de trapos y brochas humedecidas en disolvente, eliminando contaminantes tales como óxido, polvo, grasa y suciedad.

Posteriormente se realiza la aplicación de la pintura de fondo mediante soplete con el fin de evitar la oxidación, corrosión y con ello la degradación de la estructura o chasis y finalmente se aplica la pintura de acabado de color gris ártico.



Figura 17-3: Proceso de aplicación de fondo y pintura
Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022

3.4.5. Puntos de medición para diagnosticar la falla de excentricidad estática

En la bomba periférica del módulo de simulación de excentricidad estática, se define los puntos apropiados para la toma de datos y medición de variables de forma más exacta y precisa, mediante la construcción y montaje de insertos en el lado horizontal de la voluta.

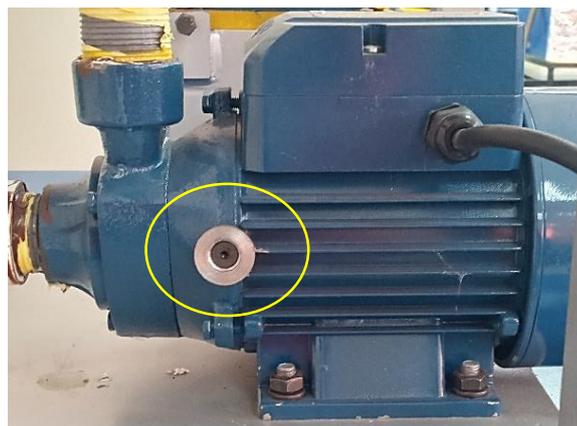


Figura 18-3: Montaje de insertos
Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022

Además, para evitar el desajuste y el desmontaje del inserto se aplica el epóxico transparente pegante a su alrededor, de esta manera se obtiene mayor sujeción del inserto dando como efecto mejores resultados durante la medición al realizar las distintas pruebas.

El epóxico pegatanke viene con 2 compuestos que son equivalentes a 46g de pegamento y 44cc de volumen de fácil adherencia. A continuación, se da a conocer el modo de empleo:

- Se realiza una limpieza del área donde se va aplicar.
- Mezclar el 50% de cada compuesto.
- Remover hasta obtener una mezcla homogénea.
- Aplicar la pega en el área limpia y seca.
- Dejar secar el tiempo requerido al sol o sombra para conseguir el resultado deseado.

Una vez curado al 100%, el pegamento resiste por varios años a numerosas condiciones físicas y químicas; así como el ataque de los productos ácidos y diversos solventes. Este producto es aplicable en diversos materiales y superficies, así como: MDF, PVC, madera, plástico, metal, vidrio, losa, cerámicas, aluminio y cobre.

Las características del pegamento por los cuales se eligió se mencionan a continuación: no es venenoso, se puede mecanizar lijar y pintar en seco ya que no se contrae ni se dilata y tampoco se deforma, es totalmente impermeable a los disolventes, no permite el paso de la humedad, previene la corrosión y abrasión.

Tabla 8-3: Propiedades del pegamento epóxico pegatanke

<p>Pegamento epóxico</p>	
<p>Tiempo de curado</p>	<p>45 minutos al sol, 1 hora y media a 2 horas bajo sombra</p>
<p>Tensión</p>	<p>580 psi</p>
<p>Temperatura</p>	<p>-30 hasta 500°C</p>
<p>Peso muerto</p>	<p>700 kg</p>
<p>Secado bajo el agua</p>	<p>10 horas</p>

Fuente: Malaga, 2020.

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022.

3.4.6. Limpieza, instalación y montaje de las piezas y equipos en general

Una vez soldadas y pintadas las estructuras metálicas es necesario una limpieza adecuada de las mismas y todos los accesorios antes realizar del montaje y ensamble del módulo.

A continuación, se realiza el montaje de la bomba periférica como el equipo fundamental para el módulo de simulación ya que permite realizar el diagnóstico vibracional de la excentricidad estática de un motor de inducción. La bomba por ser el elemento principal se ubica en la parte media de uno de los extremos de la placa base, esto facilita las mediciones espectrales cuando esté en funcionamiento.

Durante la instalación de tuberías necesarias para la conducción del fluido refrigerante, inicialmente se rosca el ducto de 1 pulgada, luego se enrolla una cantidad adecuada de teflón y una porción necesaria de pasta para evitar fugas. Por consiguiente, acoplamos los accesorios PVC, dispositivos de control y medición.

Finalmente, se realiza la conexión eléctrica a baja tensión de 110V en corriente alterna (AC) desde la bomba periférica hasta el tablero de control, para posteriormente realizar la puesta en marcha, las pruebas y los análisis respectivos.

De esta forma se culmina la construcción y el montaje del módulo de simulación para el diagnóstico vibracional de la excentricidad estática en los motores de inducción.



Figura 19-3: Módulo de simulación de la excentricidad estática

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022

3.5. Manual de mantenimiento y de operación

3.5.1. *Manual de mantenimiento*

Un manual de mantenimiento describe las normas de seguridad, la organización y los procedimientos que se utilizan para efectuar la función de mantenimiento. Como objetivo

principal se puede decir que la función de un manual de mantenimiento debe proporcionar un sistema de procesos administrativos, mediante etapas de planeación, organización, ejecución, control e inspección.

Este manual debe contener información muy precisa, concreta y detallada que contribuyan como un apoyo en las actividades de mantenimiento del módulo de simulación. En la figura 20-3 se describe la estructura necesaria para el desarrollo del manual de mantenimiento, mismo que se encuentra realizado por completo en el Anexo B.

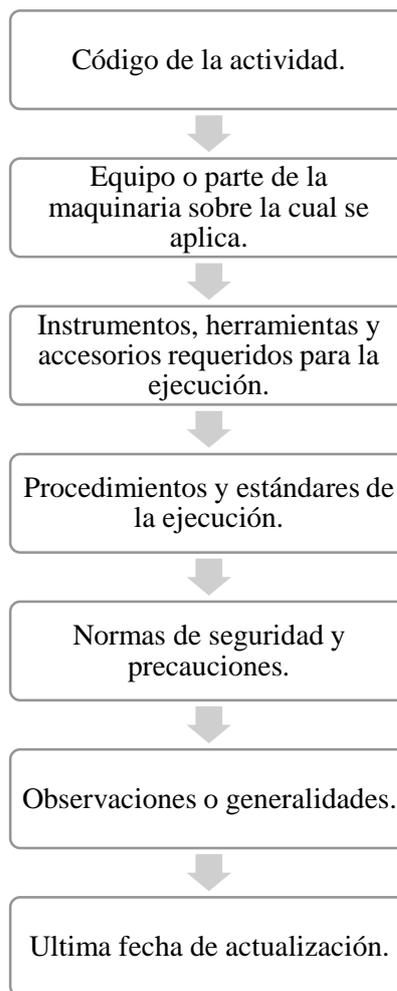


Figura 20-3: Contenido del manual de mantenimiento

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022

3.5.2. *Manual de operación*

Este manual es una herramienta técnica que integra el proceso de operación de manera ordenada todas las actividades que se deben desarrollar de la forma clara, sencilla y amigable posible, sobre todo tienen como fin de brindar la orientación necesaria al estudiante y docente encargado dando

el cumplimiento del funcionamiento óptimo del módulo de simulación, como se muestra detallada en la tabla 12-3.

Durante la operación y el funcionamiento del módulo se debe considerar las precauciones y reglas básicas de seguridad con el propósito de evitar accidentes e incidentes. En la elaboración de la práctica deben estar alertas a posibles peligros y controlar actos que atenten contra la seguridad e integridad de todo el personal quienes conforman el grupo de trabajo.

3.6. Análisis de modos de fallos y sus efectos

Para el análisis de modos y efectos de fallos (AMEF) del módulo de simulación de excentricidad estática de un motor de inducción, se basa en la norma UNE-EN-60812, puesto que es el más apropiado para sistemas, módulos o conjuntos pequeños.

Este método ayuda a identificar problemas potenciales y sus posibles efectos a causa de las fallas (ver la tabla 13-3), se utiliza esta metodología para priorizar y tomar las actividades de mantenimiento a fin de elaborar el plan de mantenimiento preventivo.

En consecuencia, se estudia los posibles fallos futuros, se evalúa la gravedad, ocurrencia y detección, finalmente para obtener el número de prioridad de riesgo (NPR) para cada falla y tomar decisiones. El NPR es un número comprendido de 1 a 1000, lo que indica la prioridad que se debe dar a cada falla para eliminar.

$$\text{NPR} = \text{S} * \text{O} * \text{D} \quad (6)$$

Donde:

S: Gravedad o severidad de fallos.

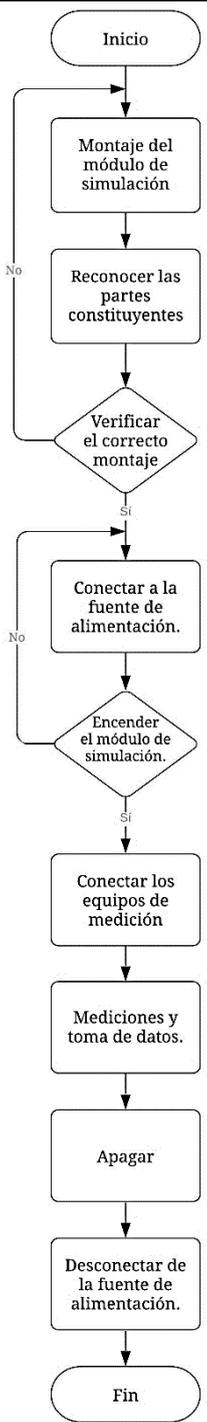
O: Probabilidad de ocurrencia.

D: Probabilidad de no detección.

Se debe tomar en cuenta que, si el NRP está por encima a 100 es un claro indicador para implementar medidas preventivas o correctivas de manera prioritaria. Mientras que, los NRP superiores a 30 se deben implementar o asignar un despliegue enfocado en el tratamiento del modo de fallo. Los criterios y valores de gravedad, probabilidad de ocurrencia y la probabilidad de no detección se detallan mediante las tablas que se encuentran a continuación.

Tabla 9-3: Manual de operación del módulo de simulación

	Proceso de operación del módulo de simulación de excentricidad estática en un motor de inducción	
	Datos técnicos - Componentes principales	Ficha: 1-1
Versión: 2021	Laboratorio de Diagnóstico Técnico y Eficiencia Energética	Ubicación: Escuela de Ingeniería en Mantenimiento Industrial

Función	Proceso	Descripción
El módulo será utilizado para la simulación de excentricidad estática en un motor inducción, mediante el cual los estudiantes podrán diagnosticar el estado del equipo a través del análisis de vibraciones.	 <pre> graph TD Inicio([Inicio]) --> Montaje[Montaje del módulo de simulación] Montaje --> Reconocer[Reconocer las partes constituyentes] Reconocer --> Verificar{Verificar el correcto montaje} Verificar -- No --> Reconocer Verificar -- Si --> Conectar[Conectar a la fuente de alimentación.] Conectar --> Encender{Encender el módulo de simulación.} Encender -- No --> Conectar Encender -- Si --> Medir[Conectar los equipos de medición] Medir --> Datos[Mediciones y toma de datos.] Datos --> Apagar[Apagar] Apagar --> Desconectar[Desconectar de la fuente de alimentación.] Desconectar --> Fin([Fin]) </pre>	Montaje del módulo de simulación en la mesa de pruebas con la ayuda de 2 personas y herramientas adecuadas.
Seguridad <ol style="list-style-type: none"> Utilizar ropa adecuada para evitar caídas y contactos. Considere diferentes áreas de tránsito (seguridad). Si el módulo se encuentra en una condición insegura, se le proporcionará el conocimiento correspondiente al técnico docente del laboratorio. Antes de iniciar las pruebas, comprobar si la parte flexible del cable está abierta o en un estado que pueda provocar un accidente. Para toma de datos se debe seguir los pasos dispuestos en la guía de laboratorio para evitar accidentes. 		Realizar el reconocimiento de las partes constituyentes del módulo.
		Verificar que el módulo de simulación se encuentre correctamente montado y fijada en la mesa de prueba.
		Colocar el líquido a bombear de aproximadamente de 2 galones en el recipiente.
		Conectar la alimentación eléctrica al suministro respectivo para las bombas periféricas.
		Verificar que el circuito esté correctamente conectado y encender desde el tablero de control.
		Conectar los equipos de medición adecuadamente.
		Realizar mediciones y toma de datos necesarios indicados en la guía de laboratorio.
		Apagar y desconectar la fuente de alimentación y las diferentes conexiones.
		Guardar todos los elementos usados en su respectivo lugar.

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022.

Tabla 10-3: Criterios de gravedad o severidad de fallos

Criterio	Valores de S
Problemas de seguridad, lesiones del personal, pérdida de función del módulo.	10
Puede poner en peligro al practicante y a todo el personal, afecta el funcionamiento del módulo.	8-9
Interrupción total o parcial del módulo en el desarrollo de la práctica, personal practicante inconformes.	6-7
Interrupciones menores del módulo, algunos practicantes conformes.	4-5
Interrupción mínima del módulo, no afectan a la seguridad del personal ni equipos.	2-3
Escasa interrupción del módulo, personal satisfecho.	1

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022.

Tabla 11-3: Criterios de probabilidad de ocurrencia

Criterio	Valores de S
Muy elevada probabilidad de perdida de función del módulo.	10
Elevada probabilidad de que afecte el funcionamiento del módulo.	8-9
Moderada probabilidad de ocurrencia de fallos.	6-7
Defectos en el módulo aparecidos en ocasiones.	4-5
Hay fallas excepcionales.	2-3
Es improbable de que exista fallas.	1

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022.

Tabla 12-3: Criterios de probabilidad de no detección

Criterio	Valores de S
Improbable que se detecten los controles.	10
Muy baja probabilidad que los controles se detecten.	8-9
Moderada probabilidad que los controles se detecten.	6-7
Es poco probable la detección de los controles.	4-5
Hay posibilidad de que los controles se detecten.	2-3
Casi seguro que los controles se detecten.	1

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022.

Tabla 13-3: Análisis de modos de fallos y sus efectos

AMEF		PRODUCTO: Modulo de simulación de excentricidad estática.				PROCESO:				RESPONSABLE:			
		ESPECIFICACIÓN: MEE-01				OPERACIÓN:				FECHA:			
		FECHA DE EDICIÓN:				ACTUAR SOBRE NPR>QUE:				REVISADO:			
Nombre del producto	Operación o función	Falla funcional	Modo de falla	Causa de falla	Efecto de falla	S	O	Controles actuales	D	NPR	Acción correctora	Responsables	
Bomba periférica	Bombear líquido refrigerante mayor o igual a 40 l/min. y genera altas vibraciones.	Incapaz de bombear líquido refrigerante.	Motor quemado	Sobrecarga eléctrica	Posible daño del tablero eléctrico	2	9	Protecciones eléctricas de las instalaciones	5	90	Inspeccionar conexiones eléctricas cada vez que realice las prácticas.	Técnico docente de laboratorio	
			Válvulas atascadas por corrosión.	Líquido refrigerante contaminado	Bajo rendimiento de la bomba	1	8	N/A	7	56	Reemplace el líquido refrigerante cada 6 meses.	Técnico docente de laboratorio	
			Impulsor trabado por un cuerpo extraño	Fragmentos de metal y PVC.	Pérdida de los alabes del impulsor	1	7	N/A	7	49	Limpieza y cambio del impulsor.	Técnico docente de laboratorio	
		Bombeea menos de 40 l/min y genera altas vibraciones.	Desgaste excesivo y prematuro en la cara del sello mecánico.	Mala manipulación de los sellos	Rayadura superficial del sello	1	7	N/A	9	63	Filtrado del líquido refrigerante en casos extremos replácelo.	Técnico docente de laboratorio	
			Fuga o rotura de la tubería	Carga excesiva o sobrepresión	Derrame del refrigerante sobre el banco de pruebas lo que aumenta los costos para mantenimiento.	1	8	N/A	9	72	Revisar la presión adecuada de los manómetros	Técnico docente de laboratorio	
			Resonancias magnéticas debidas a excentricidades.	Excesivas vibraciones del motor	Aparición de armónicos de alta y baja frecuencia que pueden dañar los equipos electrónicos conectados en el módulo de simulación.	2	7	N/A	7	98	Análisis de vibraciones cada semestre.	Técnico docente de laboratorio	

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022.

3.7. Plan de mantenimiento

El plan de mantenimiento es de suma importancia en la conservación de los equipos, tuberías y accesorios que necesita de mantenimiento con el fin de corregir, prevenir fallas y maximizar la vida útil del presente módulo de simulación de excentricidad estática de un motor de inducción.

Si bien es cierto, un plan de mantenimiento se elabora considerando los siguientes aspectos:

- Listado de equipos
- Inventario técnico de mantenimiento
- Codificación del inventario técnico
- Fichas técnicas
- Tareas y frecuencias de mantenimiento
- Plan de mantenimiento

A continuación, se realiza el desarrollo de cada aspecto aplicado al módulo de simulación de excentricidad estática de un motor de inducción, con el propósito de obtener y ofrecer una herramienta capaz de conservar y mantener los equipos del módulo en condiciones óptimas de funcionamiento.

3.7.1. Listado de equipos

Uno de los aspectos importantes para elaborar el plan de mantenimiento es reconocer cuales son los equipos, componentes y elementos a mantener.

Tabla 14-3: Listado de equipos y componentes

Sistema	Equipos	Componentes
Módulo de simulación de excentricidad estática de un motor de inducción.	Banco de pruebas de excentricidad estática.	Estructura
		Tuberías
		Accesorios
		Tanque
		Manómetro
	Bomba periférica	Motor
		Carcasa
		Impulsor
		Sello mecánico
	Tablero eléctrico	Gabinete
		Componentes eléctricos
		Barra colectora
		Canaleta
Riel metálico		
	Clemas	

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022.

3.7.2. Inventario técnico de mantenimiento

Para poder identificar de manera sencilla y rápida los equipos a mantener se realiza el paso primordial jerárquicamente, considerado también como el aspecto número uno para la elaboración del plan de mantenimiento.

A continuación, se recomienda la estructura jerárquica para el inventario técnico de mantenimiento.

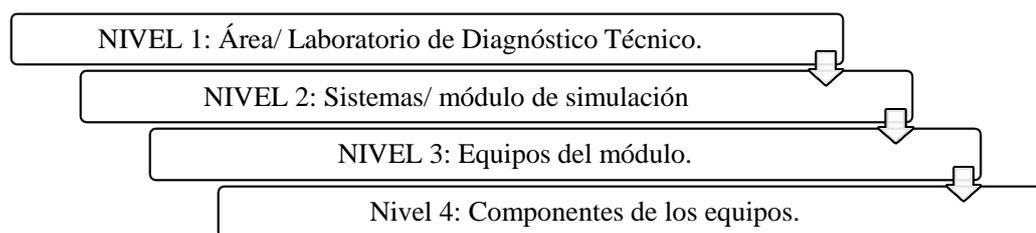


Figura 21-3: Esquema de los niveles jerárquicos para inventario del módulo de simulación

Fuente: ISO 14224, 2016

Realizado: Gamarra D.; Paca J. 2022

3.7.3. Codificación del inventario técnico

Después de realizar el inventario de todos los equipos, componentes, elementos, se procede a realizar la codificación de acuerdo a la estructura jerárquica anteriormente vista.

Tabla 15-3: Codificación del módulo de simulación

Codificación			
Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
Laboratorio de Diagnóstico Técnico.	Módulo de Excentricidad Estática	Bomba periférica	Motor Eléctrico
LDT	MEE01	BP01	01
		Banco de pruebas	Manómetro
		PB01	01
		Tablero eléctrico	Gabinete
		TE01	01

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022.

3.7.4. Ficha técnica

Una vez realizado el inventario y la codificación del módulo de simulación, se logró obtener los equipos y componentes organizados, los cuales sirven para elaborar una ficha técnica que aborde el módulo completo.

Tabla 16-3: Ficha técnica para el módulo de simulación

	FICHA TÉCNICA DE DATOS Y CARACTERÍSTICAS		Versión:	2021			
			Fecha de realización:	27/07/2021			
			Fecha de modificación:	28/07/2021			
			Elabora: Gamarra D.; Paca J.				
			Revisa: Ing. Naranjo Eugenia.				
Aprueba: Ing. Hernández Eduardo.							
DATOS GENERALES							
Nombre del equipo	MÓDULO DE SIMULACIÓN PARA EL DIAGNÓSTICO VIBRACIONAL DE LA EXCENRICIDAD ESTÁTICA DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN.						
Descripción física:	Módulo ideal para realizar prácticas de laboratorio, garantiza el pleno aprendizaje práctico y técnico del estudiante, docente y en general. En el cual puedan experimentar y generar conocimientos necesarios para la formación de profesionales en mantenimiento.						
Modelo:	Rotor Kit						
Marca:	ESPOCH						
Cod. Inventario:	LDT-MSEE-01						
Fecha de construcción:	27 julio de 2021						
Especificaciones técnicas							
Largo (mm): 378,77 Alto (mm): 920 Ancho (mm): 515 Peso (kg): 22,21 Velocidad de operación (rpm): 800 Velocidad máx. de operación (rpm): 3450							
CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA BOMBA PERIFÉRICA			CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL TANQUE				
Voltaje:	110 V	Velocidad de operación:	de 3450 rpm	Diámetro:	Alto:	Capacidad:	
Potencia:	0.5 HP	Caudal máximo:	40 l/min	260 mm	355 mm	12 l	
Corriente:	5.5 A	Altura máxima:	40 m	INSTALACIÓN TÉCNICA			
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL TABLERO ELÉCTRICO			Válvulas de esfera:	Estándar de 1"			
Corriente nominal:	20-50 A	Sistema:	Monofásico - 3 hilos				Tubería:
Voltaje de línea:	120 V	Eficiencia:	100%				Accesorios:
Frecuencia:	60 Hz	Ubicación:	Modulares Rotor kit				Manómetro:

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022.

3.7.5. Tareas y frecuencias de mantenimiento

De acuerdo, a los modos de fallas que existen en el módulo de simulación, se menciona las tareas, mismas que sirven para la elaboración del plan de mantenimiento. Además, la lista de tareas de mantenimiento se tomó de los manuales de operación de los equipos que conforman dicho módulo.

Tabla 17-3: Ficha técnica para el módulo de simulación

Tipos de tareas de mantenimiento	
1	Inspecciones preventivas
2	Inspecciones basadas en la condición
3	Trabajos preventivos
4	Trabajos correctivos
5	Reemplazos

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022.

3.7.6. Plan de mantenimiento preventivo

Una vez mencionado las tareas se procede a realizar el plan de mantenimiento preventivo con sus frecuencias y responsables tal cual se detallan en la tabla 17-3.

Tabla 18-3: Plan de mantenimiento preventivo

Plan de mantenimiento preventivo				
SISTEMA:	Módulo de simulación de excentricidad estática	Facilitadores: Gamarra Darío, Paca Jorge.	Fecha: 27/07/2021	
		Auditores: Ing. Hernández Eduardo, Ing. Naranjo Eugenia.	Fecha: 27/08/2021	
EQUIPO		Tarea	Frecuencia	Responsable
Cod.	Descripción			
BP01	Bomba periférica	Inspección del estado de la carcasa	Semestral	Técnico docente de laboratorio
		Inspección visual de presiones	Semestral	Técnico docente de laboratorio
		Inspección visual de contaminaciones	Semestral	Técnico docente de laboratorio
		Inspección de ruidos	Semestral	Técnico docente de laboratorio
		Monitoreo del motor de inducción	Semestral	Técnico docente de laboratorio

		Limpieza de la bomba	Anual	Técnico docente de laboratorio
		Inspección de fugas por sellos mecánicos	Semestral	Técnico docente de laboratorio
		Medición de vibraciones	Semestral	Técnico docente de laboratorio
PB01	Banco de pruebas	Limpieza de los accesorios	Anual	Técnico docente de laboratorio
		Limpieza externa e interna del tanque.	Semestral	Técnico docente de laboratorio
		Cambio del líquido refrigerante	Semestral	Técnico docente de laboratorio
		Inspección visual de fugas.	Semestral	Técnico docente de laboratorio
		Reemplazar las válvulas	Anual	Técnico docente de laboratorio
		Retirar las obstrucciones de tuberías	Semestral	Técnico docente de laboratorio
		Pintar las estructuras metálicas	Anual	Técnico docente de laboratorio
		Ajuste y apriete de las tuercas	Semestral	Técnico docente de laboratorio
TE01	Tablero eléctrico	Inspección visual del tablero	Semestral	Técnico docente de laboratorio
		Análisis termográfico del tablero	Semestral	Técnico docente de laboratorio
		Eliminar la acumulación de polvo y suciedad del gabinete	Semestral	Técnico docente de laboratorio
		Limpieza de los componentes eléctricos	Semestral	Técnico docente de laboratorio
		Ajuste y apriete de contactos eléctricos	Semestral	Técnico docente de laboratorio
		Medición de temperatura del interruptor térmico	Semestral	Técnico docente de laboratorio
		Revisar conexiones eléctricas	Semestral	Técnico docente de laboratorio

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022.

3.8. Elaboración de la guía de laboratorio

La guía de laboratorio es un material necesario para la realizar la práctica de diagnóstico de fallas por excentricidad estática en los motores de inducción, además proporciona y ayuda con una serie de pasos lógicos para la comprensión de lo teórico y práctico a los estudiantes. En la tabla 18-3

se describe la estructura básica necesaria para la elaboración de la guía de práctica del laboratorio, la misma que se encuentra desarrollado en su totalidad en el Anexo C.

Tabla 19-3: Contenido de la guía de laboratorio

Contenido	Descripción
Datos generales.	Nombres y apellidos, código de estudiantes, porcentaje de participación, número del grupo y las fechas de realización y entrega.
Objetivos.	Objetivos generales y específicos.
Instrucciones.	Son una serie de actividades para la realización de la práctica.
Actividades por desarrollar.	Observación y reconocimiento de instrumentos y equipos, manejo de instrumentos y equipos, toma y recolección de datos, ordenamiento y procesamiento de datos, cálculos y resultados, análisis e interpretación de resultados.
Conclusiones y recomendaciones.	Las conclusiones se complementan a base de los resultados a los objetivos planteados y las recomendaciones se redactan con fines de mejoramiento.
Bibliografía.	Listado del conjunto de referencias utilizadas.
Anexos.	Evidencias del desarrollo de la práctica de laboratorio.

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022.

CAPÍTULO IV

4. MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se describe los procedimientos para obtener o medir las variables necesarias para la consecución del módulo de simulación, especificando los tiempos de medición, duración de cada prueba y la determinación del estado de la bomba periférica bajo ciertos criterios de carga.

4.1. Criterios para pruebas y adquisición datos

Todos los criterios para la realización de pruebas y la adquisición de datos se pueden lograr siguiendo una serie de pasos lógicos que se detallan en los apartados siguientes, con la finalidad de asegurar la correcta operación y diagnóstico técnico.

4.1.1. *Condiciones de ajuste del Vibracheck ABG 200*

Este proceso se desarrolla con los módulos elaborados para el laboratorio de Diagnóstico Técnico, a fin de reconocer los armónicos característicos de fallas correspondientes a la excentricidad estática en motores de inducción, por el cual se describe en detalle a continuación.

- Disponer con el módulo de prueba apagado.
- Conectar el acelerómetro a la entrada del canal 1 del dispositivo analizador de vibraciones Vibracheck ABG 200.
- Colocar el acelerómetro en la posición radial horizontal sobre el inserto.
- Energizar el módulo de simulación a una toma de corriente de 110V.
- Conectar el dispositivo analizador a la computadora mediante el cable USB.
- Configurar los puntos de vibración en el software MAINTraQ Predictive
- Encender el dispositivo analizador Vibracheck ABG 200.
- Realizar el envío de datos desde la computadora al Vibracheck y por consiguiente se comunica con la computadora.
- Encender el módulo para proseguir a la toma de datos.
- Arrancar la bomba periférica con la válvula de succión y descarga completamente abierta, simulando sin ninguna carga, es decir, carga mínima, lo que significa a una presión de 0 psi.
- Se mide y se graba todas las mediciones configuradas para el punto de vibración establecido para 0 psi.

- Trasferir los datos medidos al punto de vibración creada con anterioridad en el software MAINTraq Predictive con el nombre “0 psi”.
- Cerrar la válvula de descarga gradualmente, de esta manera se aumenta la presión de bombeo requerida para cada prueba.
- Realizar el procedimiento anterior hasta alcanzar una presión de bombeo a 35 psi, siendo la carga máxima que se puede llegar a experimentar en este ensayo.
- Para realizar ensayos a presiones superiores a los 35 psi el tiempo de trabajo debe ser el menor posible, ya que pueden originar fallas a todo el módulo.

4.1.2. Configuración del software MAINTraq Predictive

Para obtener resultados de las mediciones adecuadas, es necesario configurar el software de mantenimiento predictivo, para crear una jerarquía de máquinas, tomar medidas y obtener los espectros de las variables necesarias tales como la velocidad y la aceleración. A continuación, se detallan los pasos a seguir.

- Abrir el programa MAINTraq Predictive.
- En la barra de opciones elegir la pestaña archivo, y configurar base de datos.
- Crear la nueva base de datos y cerrar.
- Seleccionar la base de datos creado en la lista despliegue.
- Crear una nueva carpeta con el nombre MEE1.
- Sobre la nueva carpeta crear la jerarquía de máquinas y configurar sus propiedades:

Tabla 1-4: Configuración de las propiedades de la máquina

Propiedades de la máquina	
Nombre	Bomba periférica
Potencia [kW]	0,37
Criticidad	Alta
Fundación	Rígida
rpm nominal	3450

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022.

- Sobre las jerarquías de las máquinas creamos nuevos puntos de vibraciones.
- Configuramos las propiedades de los puntos de vibraciones.

Tabla 2-4: Configuración de las propiedades de los puntos de vibración

Propiedades del Punto de Vibración		
Número	1	
Dirección	Horizontal	
Nombre	0 psi	
Sensor	Acelerómetro	
Ubicación	Unidad conducida	
Eje	1	
rpm nominal	3450	
Apoyos	Tipo:	Rodamiento
	Lubricante:	Grasa
	Rodamiento:	SKF-6202

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022.

- Repetir el paso anterior para las diferentes cargas de 0 a 35 psi.
- Sobre el punto de medición crear un nuevo espectro para las distintas cargas y configuramos las propiedades del espectro para cada una de las variables.

Tabla 3-4: Configuración de las propiedades del espectro de la variable velocidad

Variable	
Velocidad	
Medición	
Líneas espectrales	3200
Frecuencia máxima	1200 Hz
Frecuencia mínima	0 Hz
Cantidad de promedios	Sin promedios

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022.

Tabla 4-4: Configuración de las propiedades del espectro de la variable aceleración

Variable	
Aceleración	
Medición	
Líneas espectrales	3200
Frecuencia máxima	10 kHz
Frecuencia mínima	0 kHz
Cantidad de promedios	Sin promedios

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022.

- Realizar el envío de datos hacia el Vibracheck.
- Recolección y toma de datos.

- Descargar y recibir datos de los espectros y la forma de onda de las variables con distintas cargas registradas.

4.2. Frecuencia natural de los módulos de simulación

Para la obtención de la frecuencia natural (f_n) en los módulos de simulación se consideran bombas periféricas con un motor de inducción de 2 polos magnéticos y con una frecuencia fundamental de sincronismo de 60 Hz; esto de acuerdo a las especificaciones técnicas del fabricante. Para determinar el buen estado de las bombas se debe tener en cuenta que el valor de la frecuencia natural no debe coincidir en el rango de frecuencias de funcionamiento 1X o también conocida como frecuencia de rotación real.

Por lo tanto, se realizan las distintas mediciones de vibración en distintas direcciones, pero para este caso se mide solamente en una dirección radial horizontal, ubicando el acelerómetro en la parte voluta de la bomba, como se muestra en la figura 1-4.



Figura 1-4: Ubicación del acelerómetro en dirección radial horizontal

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022

Para determinar la frecuencia natural y todas las variables de interés a través de los espectros, se desarrolla con la ayuda de un acelerómetro que capta las señales de vibraciones, esto se realiza proporcionando una fuerza externa de impacto mediante el uso de un martillo de goma provocando una vibración espontánea, posteriormente dichas señales son enviadas al analizador de vibraciones y finalmente a la computadora para ser procesado a través del software MAINTraQ Viewer.

En el espectro de la figura 2-4 se puede observar los diferentes armónicos con múltiples frecuencias naturales, donde la frecuencia del armónico más cercano al rango de frecuencias fundamentales de rotación representa a la frecuencia natural, en este caso la f_n se ubica a 33,6 Hz

con una amplitud de vibración igual a 0,1667 mm/s. Siendo estas las magnitudes representativas para el correcto funcionamiento de la bomba periférica.

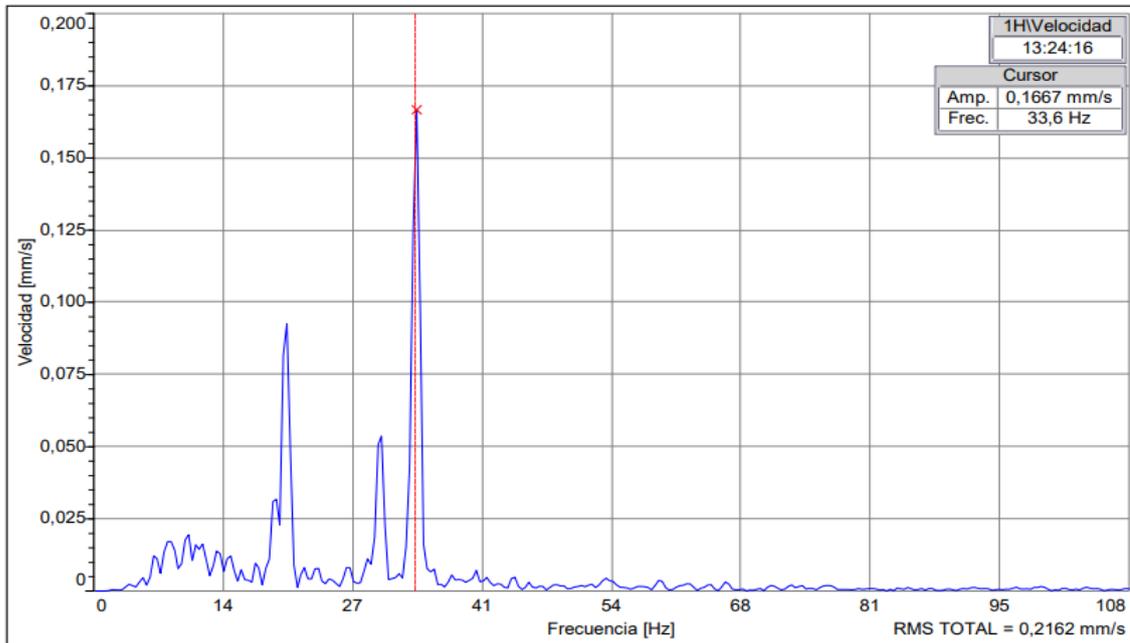


Figura 2-4: Espectro de la frecuencia natural de la bomba periférica 1

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022

Una vez realizadas las mediciones para cada una de las bombas, se procede a tabular los valores de frecuencia natural y sus respectivas amplitudes, obtenidas en condiciones del motor apagado y sin carga alguno.

Tabla 5-4: Frecuencias naturales de los armónicos de velocidad en las bombas

Nº. Bomba	Frecuencia Natural [Hz]	Amplitud [mm/s]	rms total [mm/s]
1	33,60	0,1667	0,2162
2	38,30	0,0229	0,4263
3	36,10	0,0867	0,1751
4	36,80	0,2649	0,3396

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022.

Mediante la tabla 6-4 se evidencia que las frecuencias naturales de las bombas están por debajo de los límites de las frecuencias de funcionamiento 1X representadas en la tabla 7-4, esto indica que las bombas periféricas se encuentran fuera del fenómeno vibratorio o también conocida como resonancia.

Tabla 6-4: Rangos de frecuencias de funcionamiento de las bombas periféricas

N.º Bomba	Frecuencia de rotación real [Hz]	
	mín. carga	máx. carga
1	57,400	50,600
2	57,042	50,223
3	57,312	50,251
4	57,021	49,523

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022.

Al finalizar la prueba de impacto se determina que en todos los motores de inducción la vibración es moderada puesto que las frecuencias naturales se encuentran fuera del rango establecido, y por ende no llega al punto de resonancia que pueda provocar niveles intensos de vibración causando daños prematuros y deterioros al motor eléctrico.

Cabe mencionar, que cuando la frecuencia natural llegase a coincidir con el rango de valores de las frecuencias de funcionamiento de la bomba periférica y tiene como efecto que la amplitud de vibración se va incrementar exageradamente, esto indica que existe un fenómeno llamado resonancia que puede afectar la funcionalidad de la bomba periférica. Sin embargo, la amplitud de ese armónico que representa a la frecuencia natural no se incrementa considerablemente entonces no hay ningún efecto, debido a la presencia de amortiguamiento tales como el aire, rodamientos y entre otros.

Se debe tomar en cuenta, que la resonancia puede llegar a ocasionar el deterioro significativo de los componentes mecánicos o a su vez la destrucción la bomba periférica y del módulo de simulación.

4.3. Detección de excentricidad estática en el motor de inducción

Para reconocer los armónicos característicos de falla que se presentan en los espectros correspondiente a la excentricidad estática del motor de inducción, la metodología utilizada para este estudio se realiza mediante la técnica del análisis espectral de vibraciones mecánicas.

Dicho lo anterior, se realiza las distintas pruebas en el módulo de simulación con un sistema cerrado de bombeo en succión positiva de manera que está compuesto por un motor de inducción monofásico, donde se analiza los armónicos característicos en diferentes condiciones de carga mediante el estrangulamiento del caudal a través de una válvula en la línea de descarga, es decir, incrementando la presión mínima de 0 a un máximo de 35 psi.



Figura 3-4: Medición y detección de excentricidad estática en el motor de inducción

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022

4.3.1. *Espectros de vibraciones mecánicas en el motor de inducción de las bombas*

Para comprobar que el motor de la bomba presenta excentricidad estática, se analizan las gráficas en el dominio de la frecuencia, así también la amplitud o la severidad; estos datos son obtenidos mediante el dispositivo Vibracheck a través sensor llamado acelerómetro y el software MAINTraQ Predictive.

4.3.1.1. *Espectro de vibración mecánica a mínima carga del módulo 1*

El motor de inducción bajo una carga mínima presenta el siguiente espectro, en donde se puede observar e identificar claramente la existencia de la excentricidad estática en el equipo a través del segundo armónico característico de falla situado a 120 Hz.

Asimismo, se evidencia que el armónico fundamental de rotación con mínima carga, se ubica a 57,3 Hz el mismo que corresponde a la frecuencia de rotación de 3450 rpm.

Además, para asegurar que los armónicos correspondan a la excentricidad estática, a partir de ahora las pruebas se realizan bajo distintas cargas aumentando gradualmente la presión en la línea de descarga a través de una válvula esférica. El caudal del fluido en movimiento reducirá la velocidad de rotación del motor paulatinamente, esto conlleva a que el armónico fundamental de giro cambie en el espectro de velocidad.

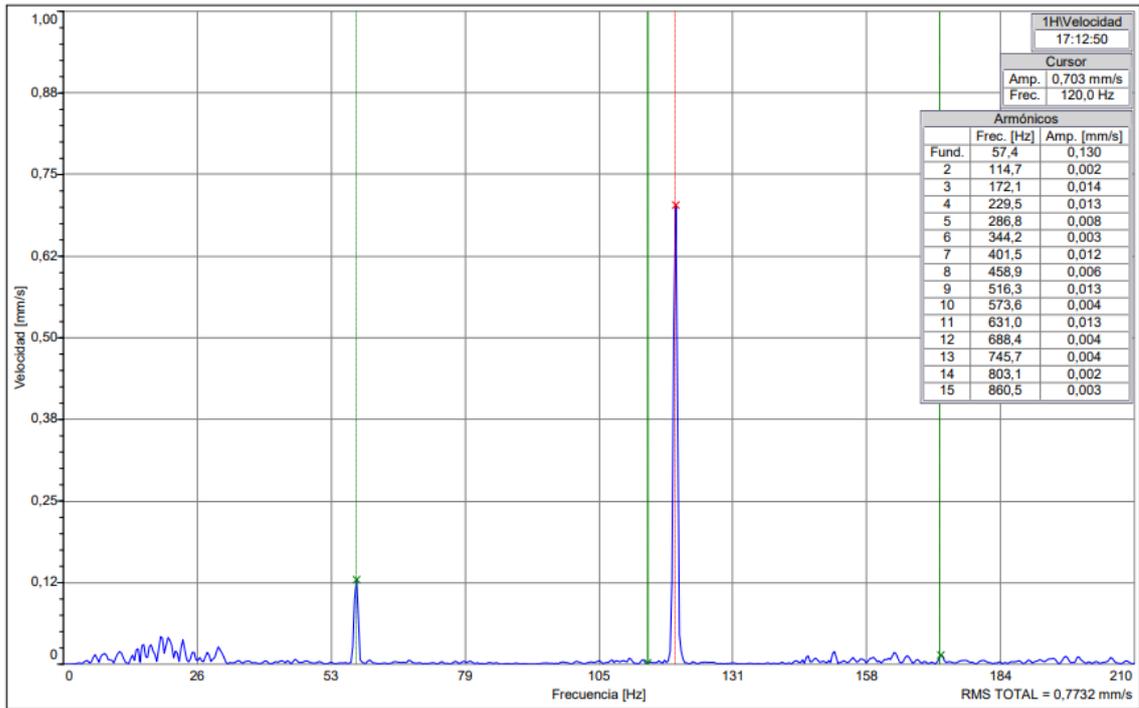


Figura 4-4: Espectro de velocidad con excentricidad estática a carga mínima del módulo 1

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022

4.3.1.2. Espectro de vibración mecánica a mínima carga del módulo 2



SOLUCIONES IDEAR S.R.L.
 Lambaré 815 3°C - C1185ABA Buenos Aires - Argentina
<http://www.idear.net.com.ar> - Email: idear@idear.net.com.ar
 Tel/Fax: +54 (11) 4863-1332

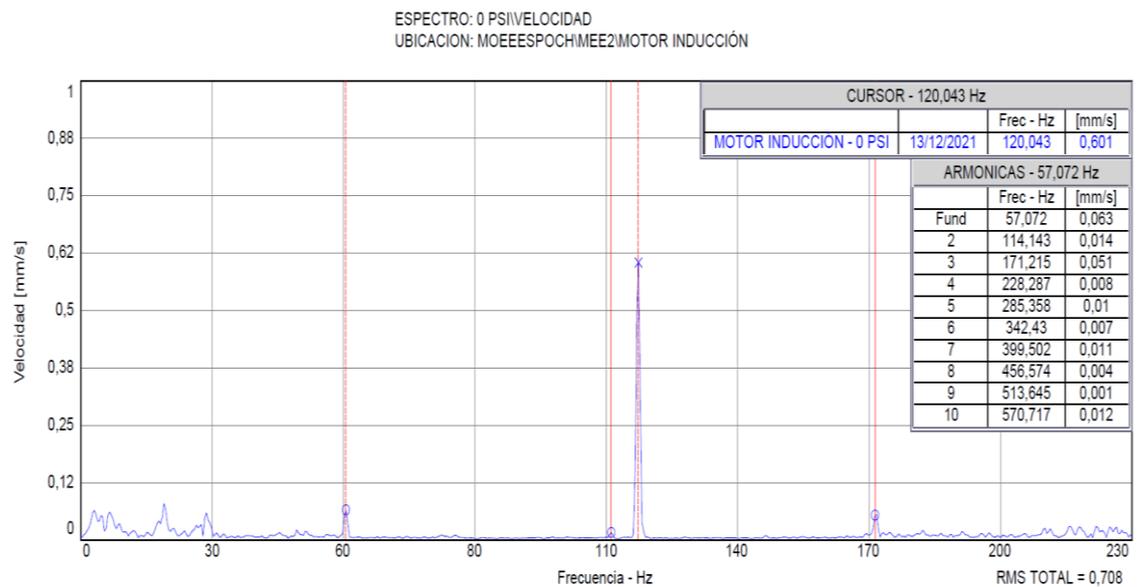


Figura 5-4: Espectro de velocidad con excentricidad estática a carga mínima del módulo 2

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022

El motor de inducción del módulo 2 bajo una carga mínima presenta el siguiente espectro, en donde se puede observar e identificar claramente la presencia de la excentricidad estática en el equipo a través del segundo armónico característico de falla situado a 120,043 Hz. Mientras tanto, el armónico fundamental de rotación con mínima carga, se ubica a 57,072 Hz el mismo que corresponde a la frecuencia de rotación de 3450 rpm.

4.3.1.3. Espectro de vibración mecánica a mínima carga del módulo 3

El motor de inducción del módulo 3 bajo una carga mínima presenta el siguiente espectro, en donde se puede apreciar claramente la presencia de la excentricidad estática en el equipo a través del segundo armónico característico de falla situado a 120,072 Hz. Mientras que, el armónico fundamental de rotación con mínima carga, se ubica a 57,312 Hz el mismo que corresponde a la frecuencia de rotación de 3450 rpm.



SOLUCIONES IDEAR S.R.L.
 Lambaré 815 3º C. - C1185ABA Buenos Aires - Argentina
<http://www.idear.net.com.ar> - Email: idear@idear.net.com.ar
 Tel/Fax: +54 (11) 4863-1332

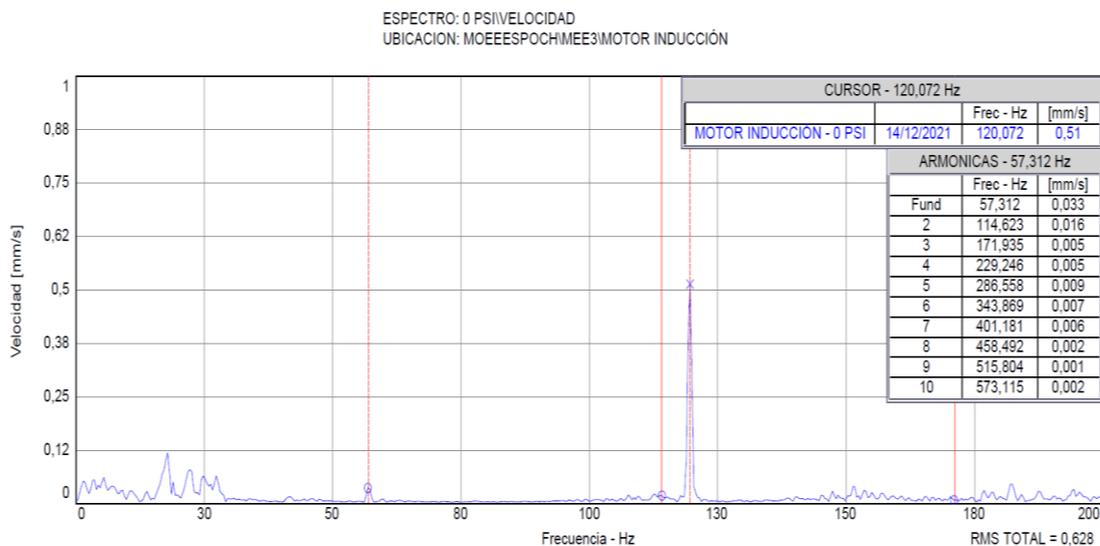


Figura 6-4: Espectro de velocidad con excentricidad estática a carga mínima del módulo 3

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022

4.3.1.4. Espectro de vibración mecánica a mínima carga del módulo 4.

El motor de inducción del módulo 4 bajo una carga mínima presenta el siguiente espectro, en donde se puede apreciar claramente la presencia de la excentricidad estática en el equipo a través del segundo armónico característico de falla situado a 120,037 Hz. Mientras que, el armónico fundamental de rotación con mínima carga, se ubica a 57,021 Hz el mismo que corresponde a la frecuencia de rotación de 3450 rpm.

ESPECTRO: 0 PSI/VELOCIDAD
 UBICACION: MOEESPOCH/MEE4/MOTOR INDUCCION

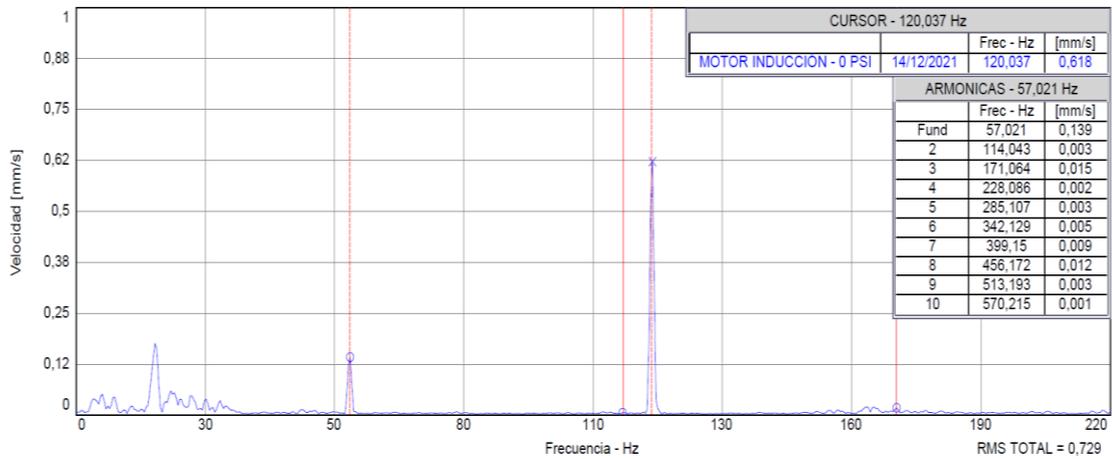


Figura 7-4: Espectro de velocidad con excentricidad estática a carga mínima del módulo 4

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022

4.3.1.5. *Espectro de vibración mecánica a máxima carga del módulo 1*

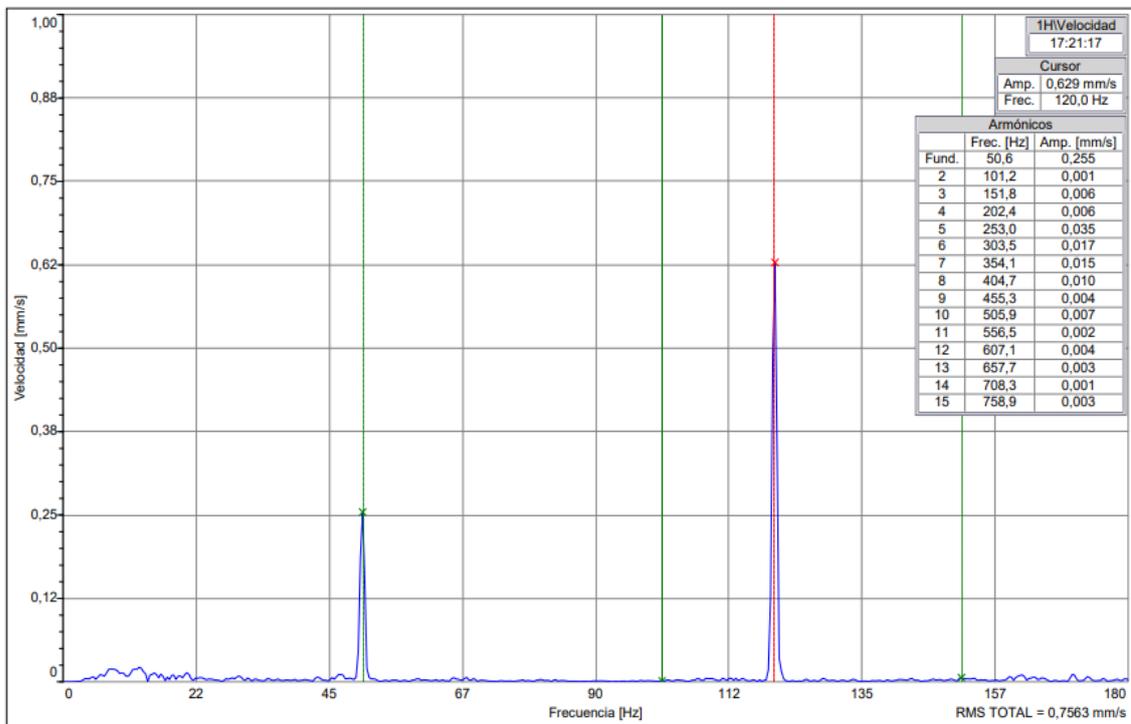


Figura 8-4: Espectro de velocidad con excentricidad estática a carga máxima del módulo 1

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022

La aplicación de la carga es directamente proporcional a la presión, siendo 35 psi la carga máxima que se puede experimentar en los ensayos presentes con la bomba periférica, pasado esta presión el tiempo de trabajo debe ser lo más corto posible para no originar problemas al módulo simulación, de esta manera sellando el paso del refrigerante a través de la válvula de descarga, es decir; el cierre completo del flujo en el sistema.

En el espectro de velocidad obtenida con la carga máxima, claramente se observa el cambio significativo de la frecuencia del armónico fundamental de rotación (1X), la correspondiente variación de la frecuencia armónica de orden superior (2X, 3X, 4X, etc.) y la constancia de la frecuencia característica de falla (2FL) ubicado a 120Hz.

El armónico fundamental de rotación a máxima carga, se ubica a 50,6 Hz el mismo que corresponde a la frecuencia de rotación de 3002 rpm, notando una disminución gradual con respecto a la frecuencia de rotación experimentada a mínima carga.

4.3.1.6. Espectro de vibración mecánica a máxima carga del módulo 2



SOLUCIONES IDEAR S.R.L.
Lambaré 815 3°C - C1185ABA Buenos Aires - Argentina
<http://www.idearnet.com.ar> - Email: idear@idearnet.com.ar
Tel/Fax: +54 (11) 4863-1332

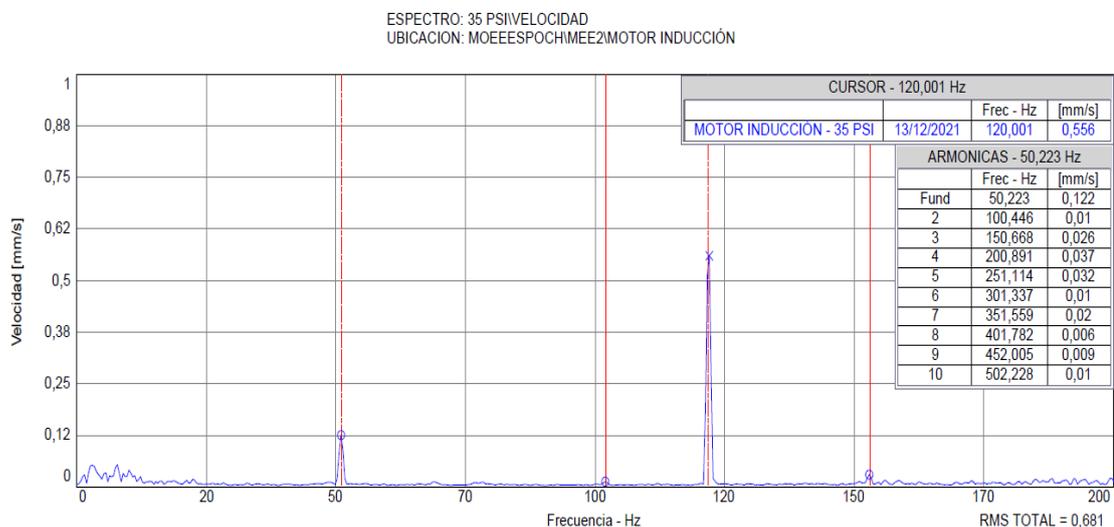


Figura 9-4: Espectro de velocidad con excentricidad estática a carga máxima del módulo 2

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022

En el espectro de velocidad obtenida con la carga máxima, claramente se observa el cambio significativo de la frecuencia del armónico fundamental de rotación, la correspondiente variación de la frecuencia armónica de orden superior y la constancia de la frecuencia característica de falla situado a 120,001Hz.

El armónico fundamental de rotación a máxima carga, se ubica a 50,223 Hz el mismo que corresponde a la frecuencia de rotación de 3011 rpm, notando una disminución gradual con respecto a la frecuencia de rotación experimentada a mínima carga.

4.3.1.7. Espectro de vibración mecánica a máxima carga del módulo 3

En el espectro de velocidad obtenida con la carga máxima, claramente se observa el cambio significativo de la frecuencia del armónico fundamental de rotación, la correspondiente variación de la frecuencia armónica de orden superior y la permanencia de la frecuencia característica de falla a 120,026 Hz.

El armónico fundamental de rotación a máxima carga, se ubica a 50,251 Hz el mismo que corresponde a la frecuencia de rotación de 3016 rpm, notando una disminución gradual con respecto a la frecuencia de rotación experimentada a mínima carga.

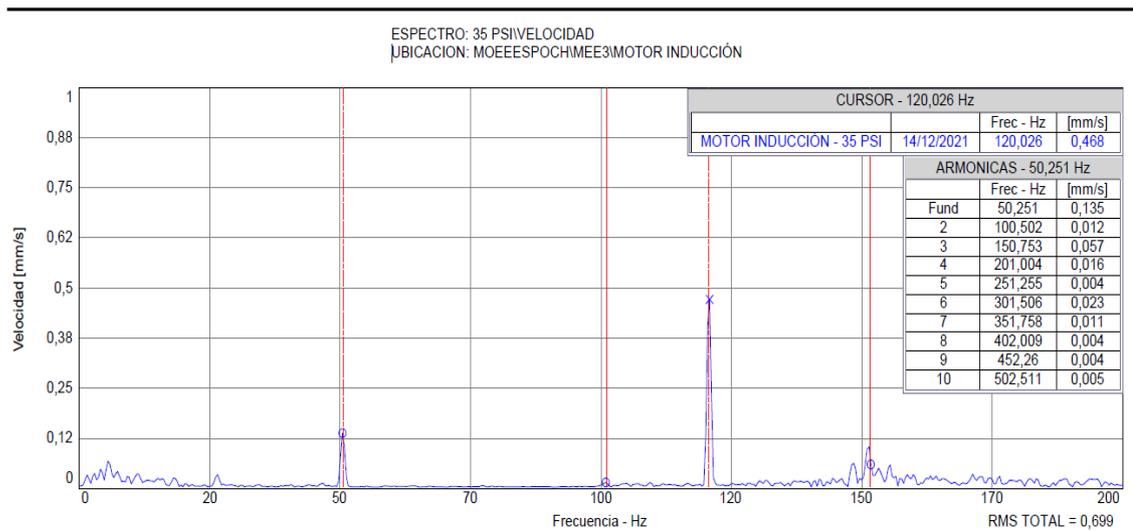


Figura 10-4: Espectro de velocidad con excentricidad estática a carga máxima del módulo 3

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022

4.3.1.8. Espectro de vibración mecánica a máxima carga del módulo 4

En el espectro de velocidad obtenida con la carga máxima, claramente se observa el cambio significativo de la frecuencia del armónico fundamental de rotación, la correspondiente variación de la frecuencia armónica de orden superior y la frecuencia característica de falla ubicada a 119,993 Hz de manera permanente.

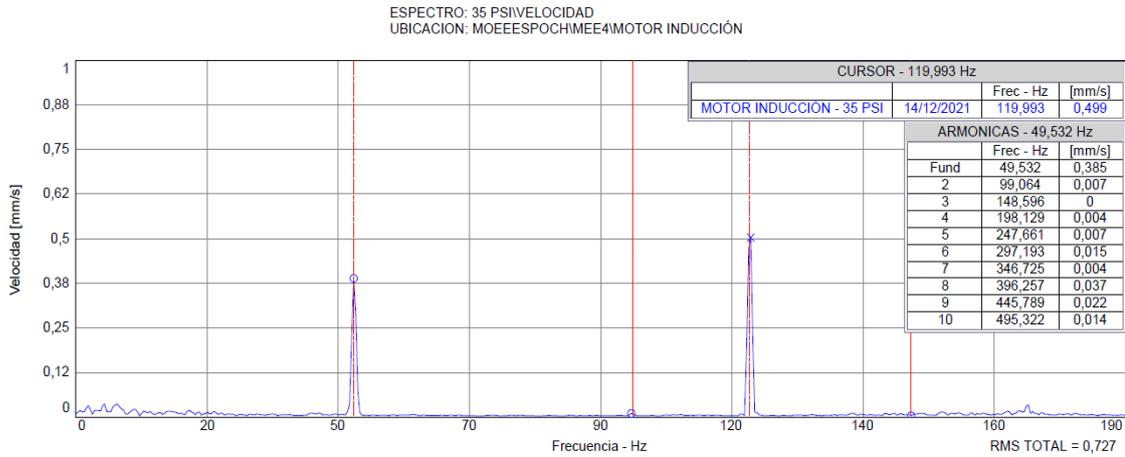


Figura 11-4: Espectro de velocidad con excentricidad estática a carga máxima del módulo 4

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022

El armónico fundamental de rotación a máxima carga, se ubica a 49,532 Hz el mismo que corresponde a la frecuencia de rotación de 2968 rpm, notando una disminución significativa con respecto a la velocidad de giro experimentada a mínima carga.

4.3.1.9. *Espectro de vibraciones mecánicas en cascada a distintas cargas del módulo 1*

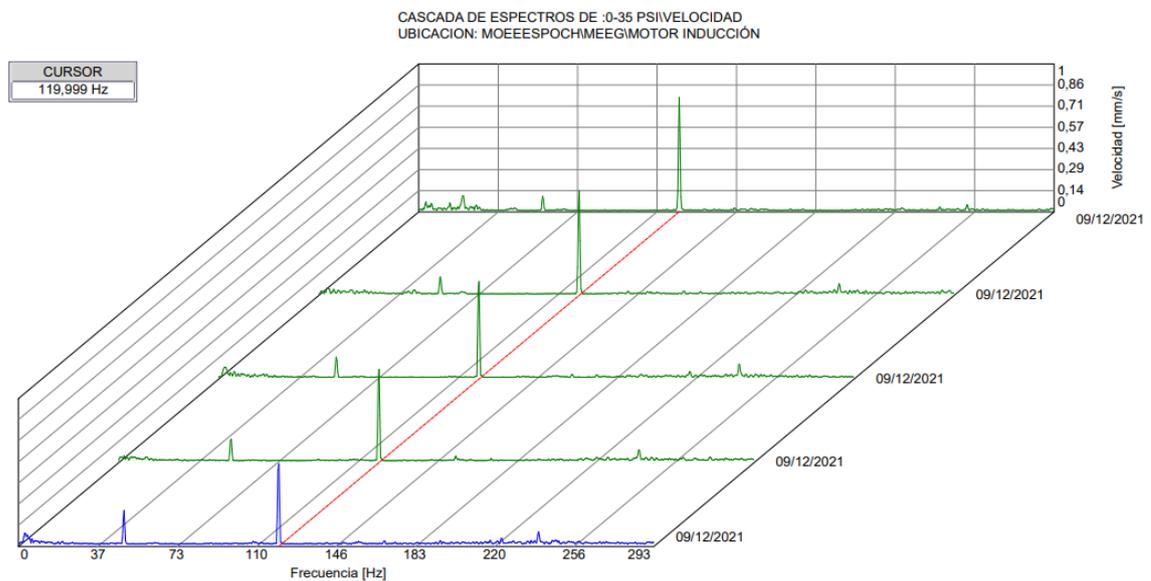


Figura 12-4: Cascadas de espectros de 0 a 35 psi

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022

Para mejorar la apreciación de los modos de fallo en el motor de inducción se realiza mediante el espectro de vibraciones mecánicas en cascada bajo distintas cargas. Donde se puede observar que

la frecuencia fundamental de giro (1X) se disminuye progresivamente y el segundo armónico que representa a la frecuencia característica de falla (2FL), es decir, la excentricidad estática se mantiene constante a 120 Hz sin presentar cambio alguno.

En el espectro en forma de cascada, también se puede visualizar que la frecuencia fundamental de giro va aumentando progresivamente el valor del pico (amplitud), el cual representa un pequeño desequilibrio en el motor a medida que se aumenta la carga.

Como se esperaba, en la figura 12-4 se observa que el valor de pico fundamental correspondiente a la falla de excentricidad estática presenta pequeños cambios con el aumento de las cargas, lo que indica que la excentricidad es realmente representativa de los armónicos determinados a 120 Hz, el cambio que existe en esta frecuencia representa a la amplitud, esto debido a los esfuerzos que realiza el motor de la bomba cuando se aumenta la carga estrangulando la válvula de descarga.

En cuanto a los módulos 2, 3 y 4 se comportan de manera similar que al módulo 1, donde existen cambios de valores pocos significativos. Estos módulos tienen en común que al aplicar mayor carga se presenta menor frecuencia fundamental de giro conservando la frecuencia característica de falla.

4.3.2. Frecuencias y amplitudes de armónicos de velocidad en el motor de inducción

A continuación, se detallan mediante tablas un resumen completo de todos los valores medidos de las frecuencias características y amplitudes de fallas con excentricidad estática en el motor, que fueron detectados claramente en los distintos espectros con la variación de cargas experimentadas. La variación de carga conduce automáticamente a un cambio de valor en cada uno de las propiedades antes mencionadas.

4.3.2.1. Frecuencias de armónicos en el motor con excentricidad estática del módulo 1

En la tabla 7-4 se puede apreciar un cambio gradual de las frecuencias en los armónicos del espectro de velocidad de mayor orden (2X, 3X y 4X), estos incrementándose al doble, al triple y al cuádruple con respecto a la frecuencia fundamental de rotación (1X).

En consecuencia, los armónicos característicos de falla correspondiente a la excentricidad estática (2FL) no presentan cambios significativos, lo que esto indica que se trata de los armónicos típicos de falla antes mencionada. Mientras tanto, los valores de las frecuencias de armónicos 1X y las de órdenes superiores se disminuyen progresivamente debido al aumento de la carga.

Tabla 7-4: Frecuencias de armónicos de velocidad con excentricidad estática del módulo 1

Presión [psi]	Frecuencias de armónicos [Hz]				
	2FL	1X	2X	3X	4X
0	120,02	57,4	114,7	172,1	229,5
10	120,03	56,3	112,7	169,0	225,3
20	120,02	54,9	109,7	164,6	219,4
30	120,04	52,6	105,2	157,8	210,4
35	120,03	50,6	101,2	151,8	202,4

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022.

En definitiva, muchos de los espectros de frecuencia aparecen como frecuencias de orden superior que tienen amplitudes muy pequeñas, es decir, son casi insignificantes que no contribuyen a la amplitud global de vibración y por esta razón no interfieren en este análisis.

4.3.2.2. Frecuencias de armónicos en el motor con excentricidad estática del módulo 2

En la tabla 8-4 se muestra cambios graduales en las frecuencias de los armónicos del espectro de velocidad de mayor orden, los cuales se duplican, triplican y cuadruplican en relación a la frecuencia fundamental de rotación respectivamente.

Tabla 8-4: Frecuencias de armónicos de velocidad con excentricidad estática del módulo 2

Presión [psi]	Frecuencias de armónicos [Hz]				
	2FL	1X	2X	3X	4X
0	120,043	57,072	114,143	171,215	228,287
10	120,105	56,155	112,310	168,464	224,619
20	119,983	54,684	109,368	164,053	218,727
30	119,984	52,331	104,662	156,993	209,324
35	120,001	50,223	100,446	150,668	200,891

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022.

Por otra parte, no hay cambio evidente en los armónicos característicos de falla correspondientes a la excentricidad estática. Mientras tanto, los valores de las frecuencias de armónicos 1X y las frecuencias de órdenes superiores se disminuyen progresivamente debido al aumento de la carga. En lo que concierne a las frecuencias de orden superior, éstas tienen amplitudes muy pequeñas que no contribuyen a la amplitud global de vibración, por lo tanto, no interfieren en este análisis.

4.3.2.3. Frecuencias de armónicos en el motor con excentricidad estática del módulo 3

La tabla 9-4 se muestra cambios graduales en las frecuencias de los armónicos del espectro de velocidad de mayor orden, los cuales se duplican, triplican y cuadruplican en relación a la frecuencia fundamental de rotación respectivamente. Por otra parte, no existe un cambio evidente en los armónicos de la frecuencia característica de falla al incrementar la carga.

Tabla 9-4: Frecuencias de armónicos de velocidad con excentricidad estática del módulo 3

Presión [psi]	Frecuencias de armónicos [Hz]				
	2FL	1X	2X	3X	4X
0	120,072	57,312	114,623	171,935	229,246
10	120,045	56,490	112,981	169,471	225,962
20	119,993	54,852	109,705	164,557	219,410
30	120,074	52,873	105,747	158,62	211,493
35	120,026	50,251	100,502	150,753	201,001

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022.

En cuanto a las frecuencias de orden superior que tienen amplitudes muy pequeñas que no contribuyen a la amplitud global de vibración, por esta razón estas frecuencias no interfieren en este análisis.

4.3.2.4. Frecuencias de armónicos en el motor con excentricidad estática del módulo 4

Tabla 10-4: Frecuencias de armónicos de velocidad con excentricidad estática del módulo 4

Presión [psi]	Frecuencias de armónicos [Hz]				
	2FL	1X	2X	3X	4X
0	120,037	57,021	114,043	171,064	228,086
10	119,995	55,850	111,700	167,551	223,401
20	119,993	54,326	108,652	162,978	217,304
30	120,079	51,508	103,016	154,523	206,031
35	119,993	49,532	99,064	148,596	198,129

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022.

En la tabla 10-4 evidentemente el módulo 4, presenta comportamientos similares al resto de los módulos de prueba, donde se mantiene casi constante la frecuencia característica de falla al incrementar la carga mediante la estrangulación del fluido refrigerante en la válvula de descarga

y de esta manera dando como resultado la disminución significativa en la frecuencia fundamental de rotación y las frecuencias de mayor orden.

En cuanto a las frecuencias de los armónicos del espectro de velocidad de mayor orden, los cuales se duplican, triplican y cuadruplican en relación a la frecuencia fundamental de rotación respectivamente, teniendo en cuenta que estas frecuencias tienen amplitudes muy pequeñas, razón por lo que no son tomadas en cuenta para el análisis.

4.3.2.5. Amplitudes de armónicos en el motor con excentricidad estática del módulo 1

La tabla 11-4 nos demuestra que las amplitudes en todos los armónicos, incluidos los armónicos que corresponden a las amplitudes características de falla por excentricidad estática presentan cambios. En cuanto a los datos correspondientes a la amplitud de la frecuencia 1X es proporcional al nivel de desequilibrio, siendo esto una de las causas más probables de vibración en el motor de inducción. En consecuencia, esto significa que al incrementar la carga en el motor la falla aumenta o se vuelve más agresiva, el mismo que causará la destrucción o la degradación de otros elementos mecánicos como en el caso de los rodamientos.

Tabla 11-4: Amplitudes de armónicos de velocidad con excentricidad estática del módulo 1

Presión [psi]	Amplitudes de armónicos [mm/s]					rms [mm/s]
	2FL	1X	2X	3X	4X	
0	0,703	0,130	0,002	0,014	0,013	0,7732
10	0,787	0,139	0,006	0,005	0,012	0,9440
20	0,690	0,164	0,003	0,008	0,035	0,7746
30	0,667	0,184	0,002	0,006	0,003	0,7498
35	0,629	0,255	0,001	0,006	0,006	0,7563

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022.

4.3.2.6. Amplitudes de armónicos en el motor con excentricidad estática del módulo 2

De acuerdo a la tabla 12-4 se evidencia que las magnitudes correspondientes a las amplitudes características de falla por la excentricidad estática, varía. El dato de la magnitud correspondiente a la frecuencia 1X es proporcional al nivel de desequilibrio, siendo esto el que produce las vibraciones en el motor, a medida que aumenta la carga. Lo que significa que la posible falla de desequilibrio aumenta, el cual conduce a la destrucción o degradación de otros elementos mecánicos.

Tabla 12-4: Amplitudes de armónicos de velocidad con excentricidad estática del módulo 2

Presión [psi]	Amplitudes de armónicos [mm/s]					rms [mm/s]
	2FL	1X	2X	3X	4X	
0	0,601	0,063	0,014	0,051	0,008	0,708
10	0,683	0,062	0,028	0,044	0,027	0,730
20	0,612	0,033	0,005	0,044	0,017	0,714
30	0,607	0,042	0,003	0,032	0,046	0,718
35	0,556	0,122	0,010	0,026	0,037	0,681

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022.

4.3.2.7. Amplitudes de armónicos en el motor con excentricidad estática del módulo 3

Los valores de todas las amplitudes que se aprecian en la tabla 13-4, presentan cambios representativos. Cabe mencionar que en la frecuencia fundamental de giro existe un incremento, a medida que aumenta la carga provocando un nivel de desequilibrio, es decir, esta falla conduce al deterioro y al desgaste de los elementos mecánicos.

Tabla 13-4: Amplitudes de armónicos de velocidad con excentricidad estática del módulo 3

Presión [psi]	Amplitudes de armónicos [mm/s]					rms [mm/s]
	2FL	1X	2X	3X	4X	
0	0,510	0,033	0,016	0,005	0,005	0,628
10	0,921	0,032	0,022	0,016	0,027	1,011
20	0,856	0,052	0,031	0,016	0,025	1,022
30	0,879	0,080	0,007	0,073	0,023	1,001
35	0,468	0,135	0,012	0,057	0,016	0,699

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022.

4.3.2.8. Amplitudes de armónicos en el motor con excentricidad estática del módulo 4

Tabla 14-4: Amplitudes de armónicos de velocidad con excentricidad estática del módulo 4

Presión [psi]	Amplitudes de armónicos [mm/s]					rms [mm/s]
	2FL	1X	2X	3X	4X	
0	0,618	0,139	0,003	0,015	0,002	0,729
10	0,660	0,142	0,007	0,003	0,016	0,807
20	0,613	0,175	0,004	0,011	0,013	0,745
30	0,581	0,251	0,004	0,001	0,024	0,731
35	0,499	0,385	0,007	0	0,004	0,727

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022.

Puesto que los comportamientos de los módulos son similares, se puede evidenciar cambios considerables en cuanto a todas las amplitudes. Cabe resaltar que los valores de las amplitudes de la frecuencia 1X, conlleva como amenaza al desequilibrio del motor a medida que se aumenta la carga, esto provocando daños significativos en los elementos mecánicos.

4.4. Análisis e interpretación de datos

Una vez aplicado los instrumentos de medición y recolección de datos, generados los espectros y tabulado los datos se procede a realizar los correspondientes análisis gráficos, por cuanto la información que se genera en este análisis e interpretación de datos es la que indica las conclusiones a las cuales llega este trabajo técnico.

4.4.1. Análisis de vibraciones mecánicas con excentricidad estática

Del mismo modo, se realiza el análisis gráfico de cada una de las bombas periféricas, con el conjunto de datos experimentados a carga mínima y máxima.

4.4.1.1. Análisis de resultados de datos de las frecuencias del módulo 1

Con el desarrollo de la gráfica, se puede evidenciar de mejor manera que la excentricidad estática presenta armónicos característicos a frecuencias específicas en el análisis espectral de vibraciones mecánicas, dicha frecuencia es el doble de la frecuencia de línea, es decir; igual a 2FL mismos que están a 120 Hz y corresponden a las excentricidades estáticas en el motor de inducción.

Los ensayos experimentados en el módulo de pruebas se realizaron a cargas variables, donde afirma la existencia del modo de falla de excentricidad estática de manera permanente en el motor, puesto que no se puede aumentar o disminuir la severidad del modo de falla, más bien es posible variar la carga en el motor, por el cual debe tener variaciones en los armónicos fundamental de rotación y en los de mayor orden, excepto los armónicos característicos de fallas a 120 Hz.

La presencia de excentricidad estática genera armónicos a frecuencias características que no están involucradas a las cargas variables aplicados al motor. Por tanto, el objetivo es observar que los armónicos correspondientes a las excentricidades estáticas permanezcan fijos en el dominio frecuencial de los espectros de velocidad.

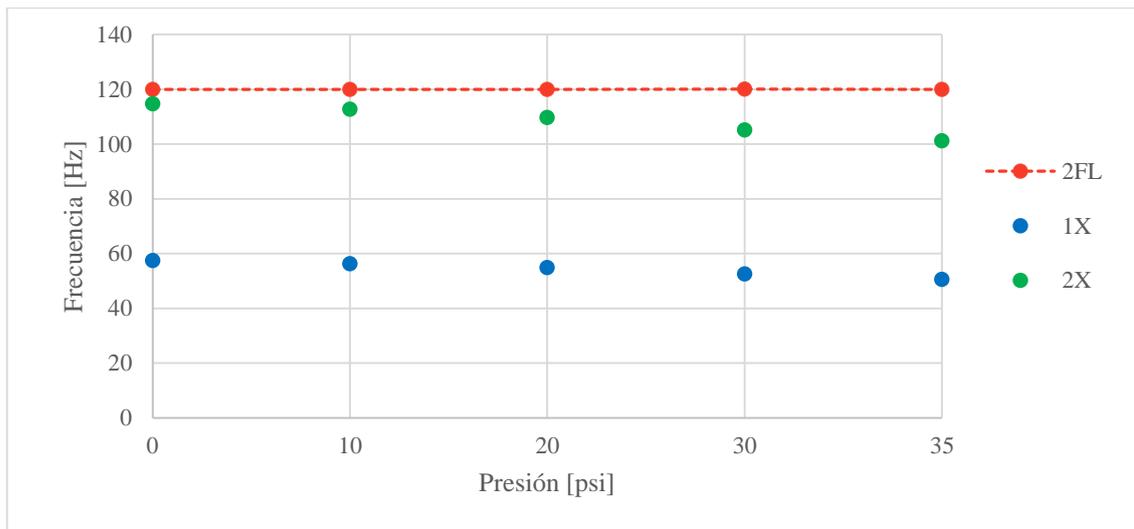


Gráfico 1-4: Curva característica de carga vs frecuencia

Realizado por: Gamarra, D.; Paca, J. 2022

Las curvas características obtenidas a partir del análisis espectral de las vibraciones mecánicas que se muestran en la gráfico 1-4, se observa claramente las variaciones de cada uno de los armónicos de 1X y los de mayor orden 2X, por ende la magnitud de la frecuencia fundamental de rotación disminuye gradualmente en el dominio de la frecuencia a nivel del espectro, este decrecimiento se debe al hecho de que la carga en el sistema de bombeo varía mediante la estrangulación del fluido refrigerante a través de la válvula de esfera el mismo que se encuentra en la línea de descarga de la mencionada bomba.

A medida que se incrementa la carga, el motor reduce la velocidad del eje y aumenta el porcentaje de deslizamiento y esto produciendo variaciones en los armónicos 1X y los de mayor orden.

La curva característica que corresponde a la excentricidad estática, permanece constante sin variar en el dominio de la frecuencia aun cuando se varía la carga, esto significa que cuando la falla se encuentra permanente con una amplitud constante, el armónico permanece en el mismo punto independientemente de la velocidad del eje el cual varía en función de la carga, esto lleva a concluir que los armónicos situados a 120 Hz que se observan en el eje X de la figura 1-4 si representan a la excentricidad estática.

4.4.1.2. *Análisis de resultados de datos de las frecuencias del módulo 2*

Del mismo modo, los ensayos experimentados presentan la curva característica que afirma la existencia del modo de fallo de la excentricidad estática a 120 Hz, sin variar en el dominio de la frecuencia, es decir que permanecen constante aun cuando se varía la carga.

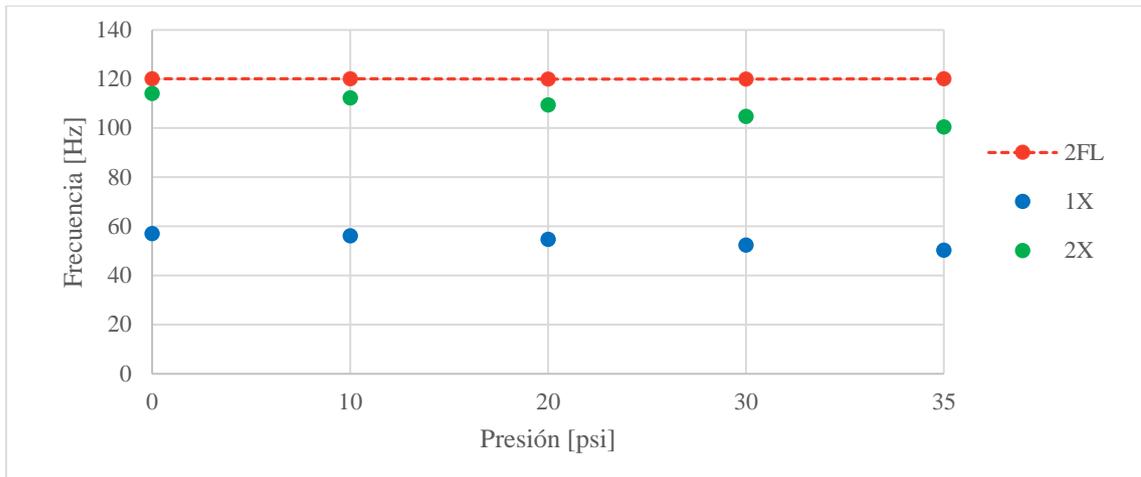


Gráfico 2-4: Curva característica de carga vs frecuencia

Realizado por: Gamarra, D.; Paca, J. 2022

A medida que se incrementa la carga, el motor reduce la velocidad del eje y aumenta el porcentaje de deslizamiento que produce variaciones en los armónicos 1X y los de mayor orden. Por ende, la magnitud de la frecuencia fundamental de rotación disminuye gradualmente en el dominio de la frecuencia a nivel del espectro, este decrecimiento se debe al hecho de que la carga en el sistema de bombeo varía mediante la estrangulación del fluido refrigerante a través de la válvula de esfera.

4.4.1.3. Análisis de resultados de datos de las frecuencias del módulo 3

Al observar la gráfica 3-4, también afirma la existencia del modo de fallo de la excentricidad estática situado a 120 Hz de manera permanente aun cuando existe la variación de carga. Pero a medida que se incrementa la carga el motor reduce la velocidad del eje y aumenta el porcentaje de deslizamiento que produce variaciones en los armónicos 1X y los de mayor orden.

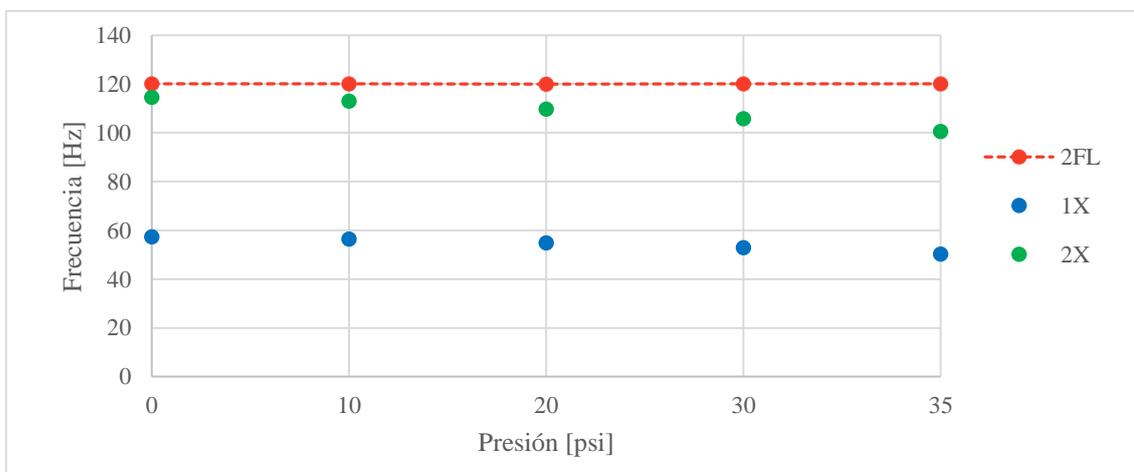


Gráfico 3-4: Curva característica de carga vs frecuencia

Realizado por: Gamarra, D.; Paca, J. 2022

4.4.1.4. Análisis de resultados de datos de las frecuencias del módulo 4

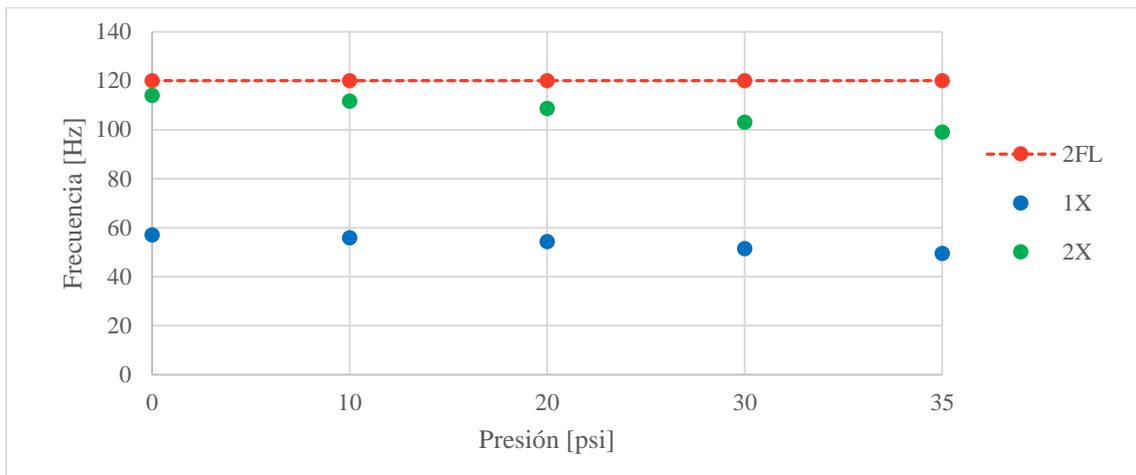


Gráfico 4-4: Curva característica de carga vs frecuencia

Realizado por: Gamarra, D.; Paca, J. 2022

De manera general, hay que mencionar que en todos los 4 módulos presentados se observa el modo de fallo de la excentricidad estática que corresponde a una frecuencia característica de falla a 120 Hz. De igual manera tanto las frecuencias fundamentales de giro como las frecuencias de orden superior decrecen de acuerdo a la carga que se aplica.

4.4.1.5. Análisis de resultados de datos de las amplitudes del módulo 1

En primera instancia, el valor de las amplitudes aumenta debido al cambio del contexto operacional en la bomba, por lo que es conveniente analizar los cambios de la amplitud mediante el análisis de vibración de los espectros de velocidad.

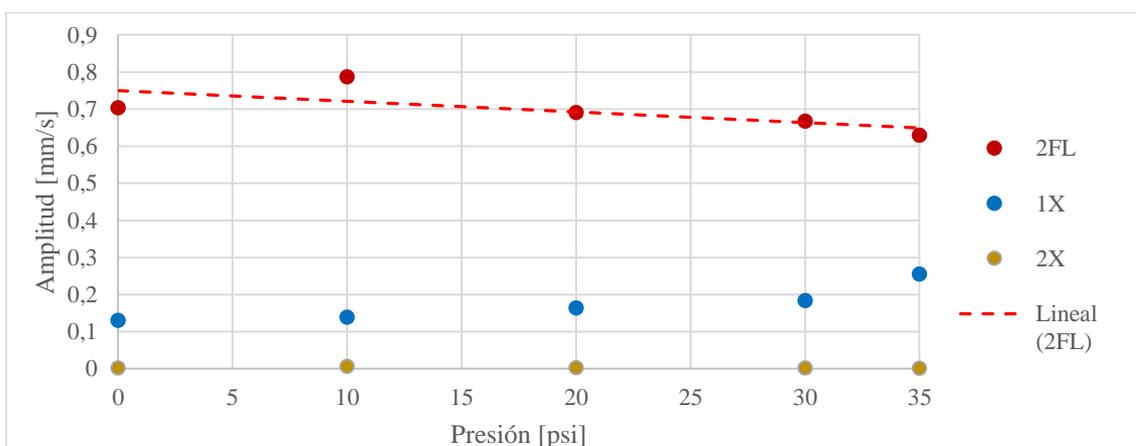


Gráfico 5-4: Curva característica de carga vs amplitud de la bomba 1

Realizado por: Gamarra, D.; Paca, J. 2022

En el gráfico 5-4 se observa, que existe un decremento minucioso en la amplitud de la curva característica de falla (2FL) en función a la carga aplicada. Además, se observa que las amplitudes de los armónicos 1X se incrementan a medida que se varía la presión, esto se debe al cambio de contexto operacional en la bomba, dando como consecuencia la posible generación de fallas funcionales en el motor correspondiente al desequilibrio, mientras que los armónicos de orden superior se mantienen estables, esto muy independiente de la carga que se le aplica.

4.4.1.6. Análisis de resultados de datos de las amplitudes del módulo 2

Mediante el grafico 6-4 se puede observar que existe una ligera disminución en la amplitud de la curva característica de falla (2FL) en función de la carga aplicada. Mientras que los valores de la amplitud correspondientes a los armónicos 1X aumentan, puesto que cambia el contexto operacional de la bomba, esto puede generar las posibles fallas funcionales que representan al desequilibrio en el motor.

En cuanto a los valores de las amplitudes perteneciente a los armónicos de orden superior (2X) se mantienen casi estables ya que es muy independiente de las cargas que se aplica.

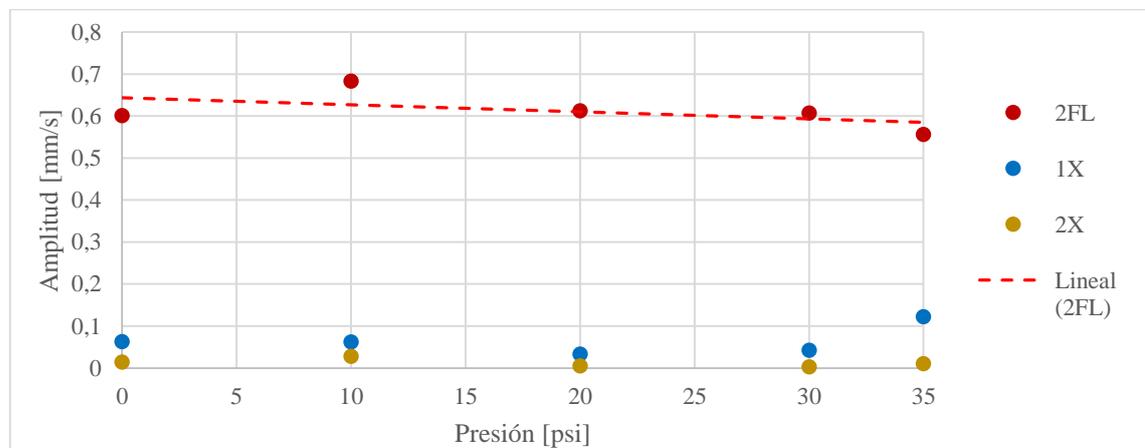


Gráfico 6-4: Curva característica de carga vs amplitud de la bomba 2

Realizado por: Gamarra, D.; Paca, J. 2022

4.4.1.7. Análisis de resultados de datos de las amplitudes del módulo 3

En el grafico 7-4 se puede identificar directamente el comportamiento un tanto distinto al resto de los módulos, ya que la curva característica de falla presenta un nivel equilibrio en función de la carga aplicada. Mientras que los valores de la amplitud correspondientes a los armónicos 1X aumentan de manera minucioso, esto generando fallas no significativas al motor.

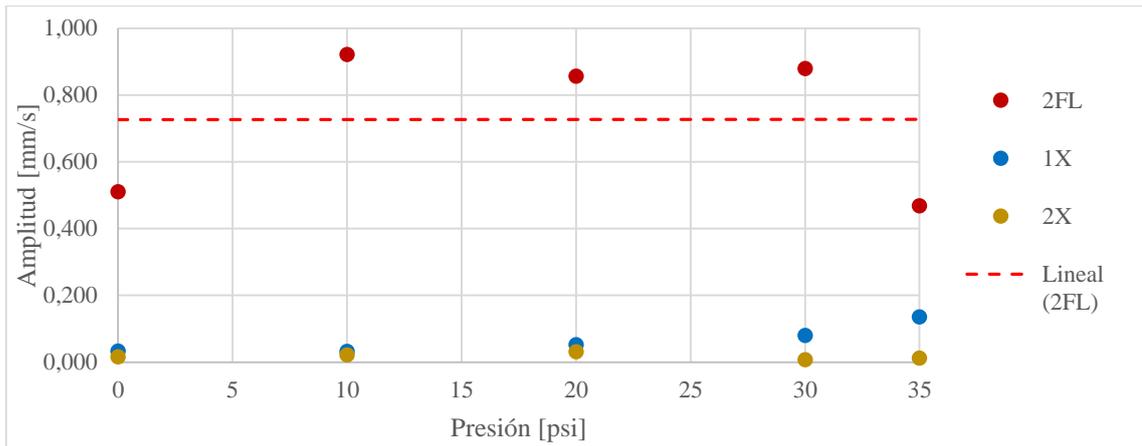


Gráfico 7-4: Curva característica de carga vs amplitud de la bomba 3

Realizado por: Gamarra, D.; Paca, J. 2022

En cuanto a los valores de las amplitudes perteneciente a los armónicos de orden superior se mantienen casi estables ya que es muy independiente de las cargas que se aplica.

4.4.1.8. Análisis de resultados de datos de las amplitudes del módulo 4

En casos extremos, los valores de las amplitudes de los armónicos característica de falla (2FL) correspondiente a la excentricidad estática presentan una disminución progresiva con respecto a las cargas aplicadas. Mientras tanto, en el armónico correspondiente a la amplitud de la frecuencia fundamental de giro (1X) existe un crecimiento gradual, por el cambio del contexto operacional de la bomba, dando como evidencia un desequilibrio significativo en el motor.

Sin embargo, los valores de las amplitudes de los armónicos de orden superior no presentan cambios mayores, es decir, se mantienen casi constantes.

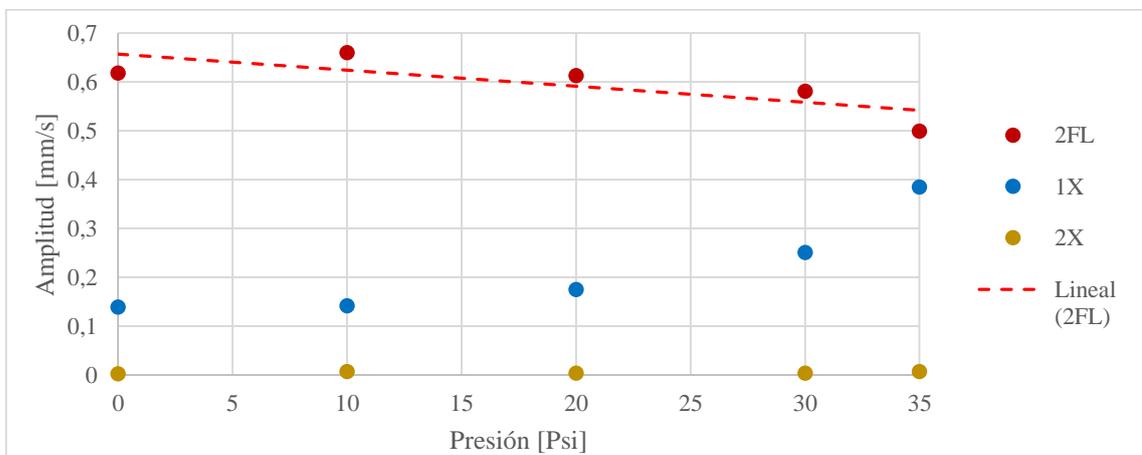


Gráfico 8-4: Curva característica de carga vs amplitud de la bomba 4

Realizado por: Gamarra, D.; Paca, J. 2022

4.4.2. Test de correlación de las bombas periféricas

Como se ha indicado en el apartado del capítulo 2, el coeficiente de correlación de Pearson es un índice cuyos valores absolutos oscilan entre 0 y 1. Dando a entender que es un índice de fácil ejecución e interpretación para verificar la existencia de la correlación entre 2 variables cuantitativas.

Para este estudio denominado diagnostico vibracional de la excentricidad estática en los motores de inducción, la prueba se realiza con la ayuda del software RStudio, mismo que sirve para identificar la correlación entre variables de presión, frecuencia fundamental de rotación (1X) y la frecuencia característica de falla (2FL) que representa a la excentricidad estática.

4.4.2.1. Análisis de correlación de la bomba periférica 1

En primera instancia se declaran las variables de presiones, frecuencias fundamentales de rotación y las frecuencias características de falla, en el software RStudio se establece mediante los siguientes acrónimos p, x1, fl2 respectivamente.

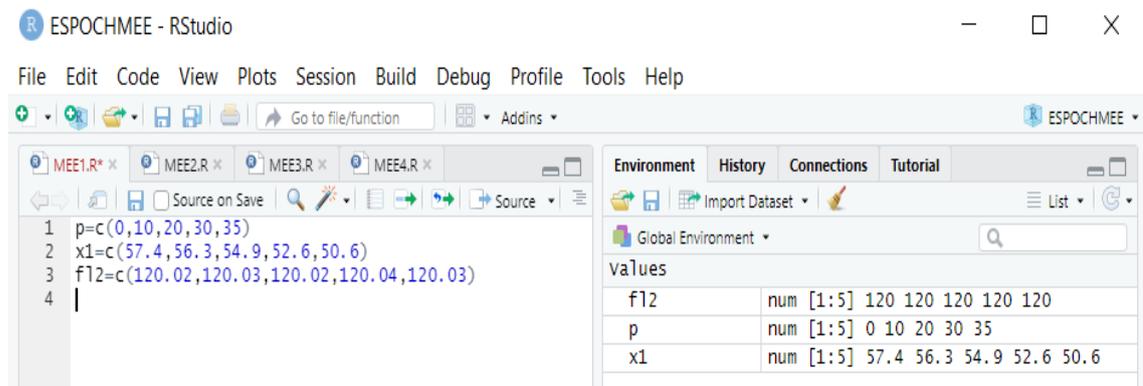


Figura 13-4: Declaración de variables en RStudio

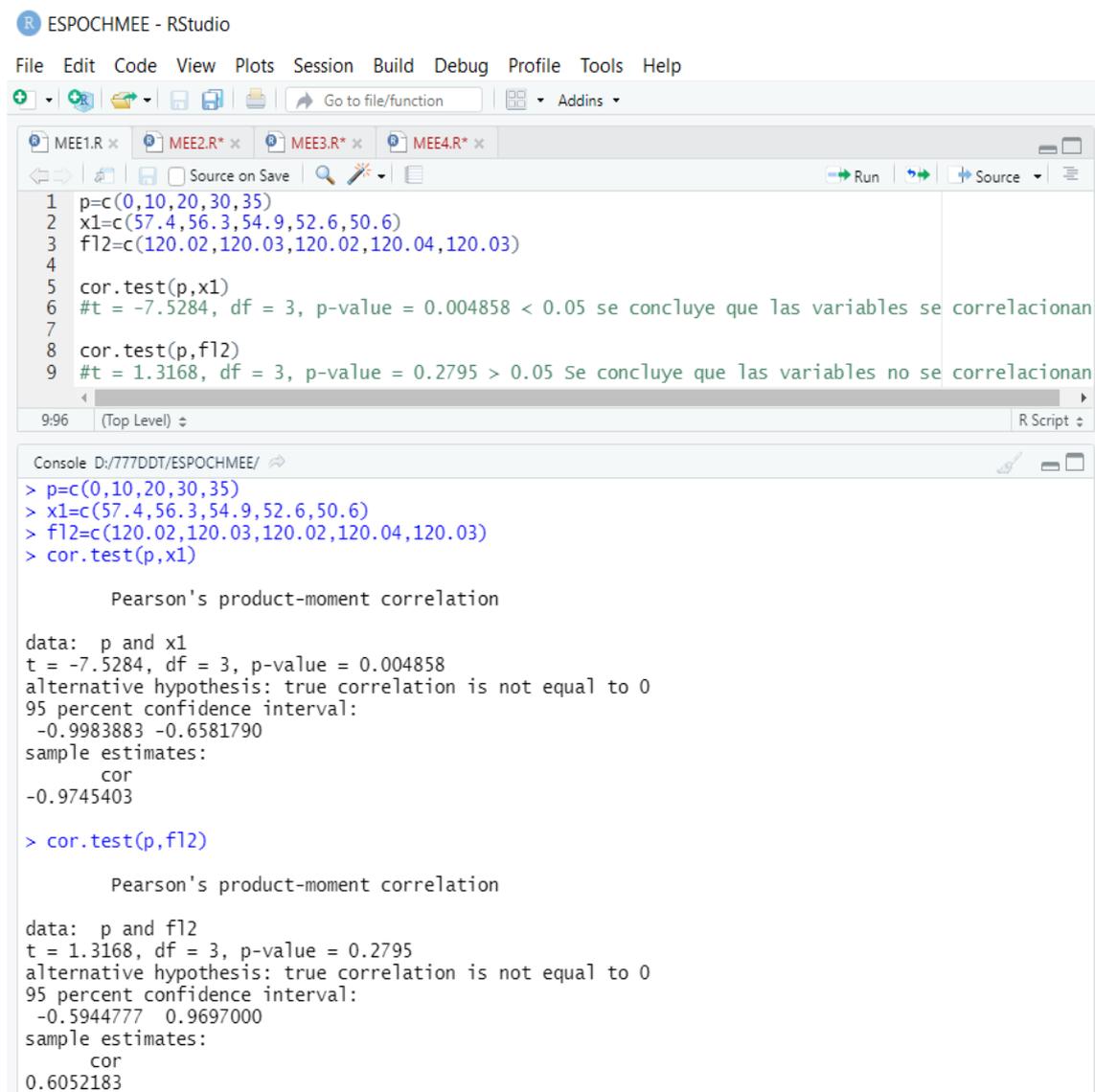
Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022

A continuación, para determinar la correlación entre ambas variables se ejecuta los siguientes códigos `cor.test(p, x1)` para las variables de presión y frecuencia fundamental de rotación y `cor.test(p, fl2)` para las variables de presión y frecuencia característica de falla, dichos códigos se ejecutan mediante las teclas Ctrl+Enter.

Por consiguiente, en la figura 14-4 mediante el cálculo se puede evidenciar que el estadístico de prueba da como resultado -7,5284 y el p-valor correspondiente a 0,004858; siendo este último valor menor a 0,05 dando a entender que existe una correlación de manera inversa entre las

presiones y las frecuencias fundamentales de rotación, es decir, el aumento de las presiones influye en la disminución considerable de las frecuencias 1X.

En cuanto a las variables de las presiones y las frecuencias características de falla (2FL), el estadístico de prueba resulta ser 1,3168 y su p-valor respectivo de 0,2795 mismo que es mayor a 0,05; dando como evidencia de que no existe la correlación entre las variables. En definitiva, la presión no influye en el valor de la variable 2FL, de modo que el incremento de la presión no hace que varíe la frecuencia característica de falla, es decir, es consistente con el modo de falla que tiene la bomba. Además, en términos estadísticos este test de correlación se evalúa con un 95% de confianza para ambos casos.



```
ESPOCHMEE - RStudio
File Edit Code View Plots Session Build Debug Profile Tools Help
MEE1.R x MEE2.R* x MEE3.R* x MEE4.R* x
Source on Save Run Source
1 p=c(0,10,20,30,35)
2 x1=c(57.4,56.3,54.9,52.6,50.6)
3 f12=c(120.02,120.03,120.02,120.04,120.03)
4
5 cor.test(p,x1)
6 #t = -7.5284, df = 3, p-value = 0.004858 < 0.05 se concluye que las variables se correlacionan
7
8 cor.test(p,f12)
9 #t = 1.3168, df = 3, p-value = 0.2795 > 0.05 Se concluye que las variables no se correlacionan

9:96 (Top Level) R Script

Console D:/777DDT/ESPOCHMEE/
> p=c(0,10,20,30,35)
> x1=c(57.4,56.3,54.9,52.6,50.6)
> f12=c(120.02,120.03,120.02,120.04,120.03)
> cor.test(p,x1)

Pearson's product-moment correlation

data: p and x1
t = -7.5284, df = 3, p-value = 0.004858
alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0
95 percent confidence interval:
-0.9983883 -0.6581790
sample estimates:
cor
-0.9745403

> cor.test(p,f12)

Pearson's product-moment correlation

data: p and f12
t = 1.3168, df = 3, p-value = 0.2795
alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0
95 percent confidence interval:
-0.5944777 0.9697000
sample estimates:
cor
0.6052183
```

Figura 14-4: Pruebas de correlación de la bomba periférica 1

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022

Para entender de mejor manera el coeficiente de correlación de Pearson (r) y complementar este test, se realiza las siguientes gráficas de correlograma según el estadístico de Pearson para cada una de las pruebas realizadas mediante el trozo de código que se aprecia en el gráfico 9-4. Obviamente, con dichas graficas queda claro que cuanto más cercano a 1 sea el valor r (cor) calculado mayor es la correlación y menor cuanto más se acerca a 0.

En otros términos, se dice que la correlación entre dos variables es perfecta positiva cuando exactamente en la medida que aumenta una de ellas aumenta la otra. De mismo modo, se dice que la correlación entre dos variables es perfecta negativa cuando exactamente en la medida que aumenta una de ellas la otra disminuye.

En consecuencia, a través de estas graficas también se considera el color de fondo que tiene el coeficiente de correlación lineal de Pearson r (cor), dado que, si es totalmente rojo hay correlación positiva y si es totalmente azul hay correlación negativa.



Gráfico 9-4: Correlograma de la bomba periférica 1

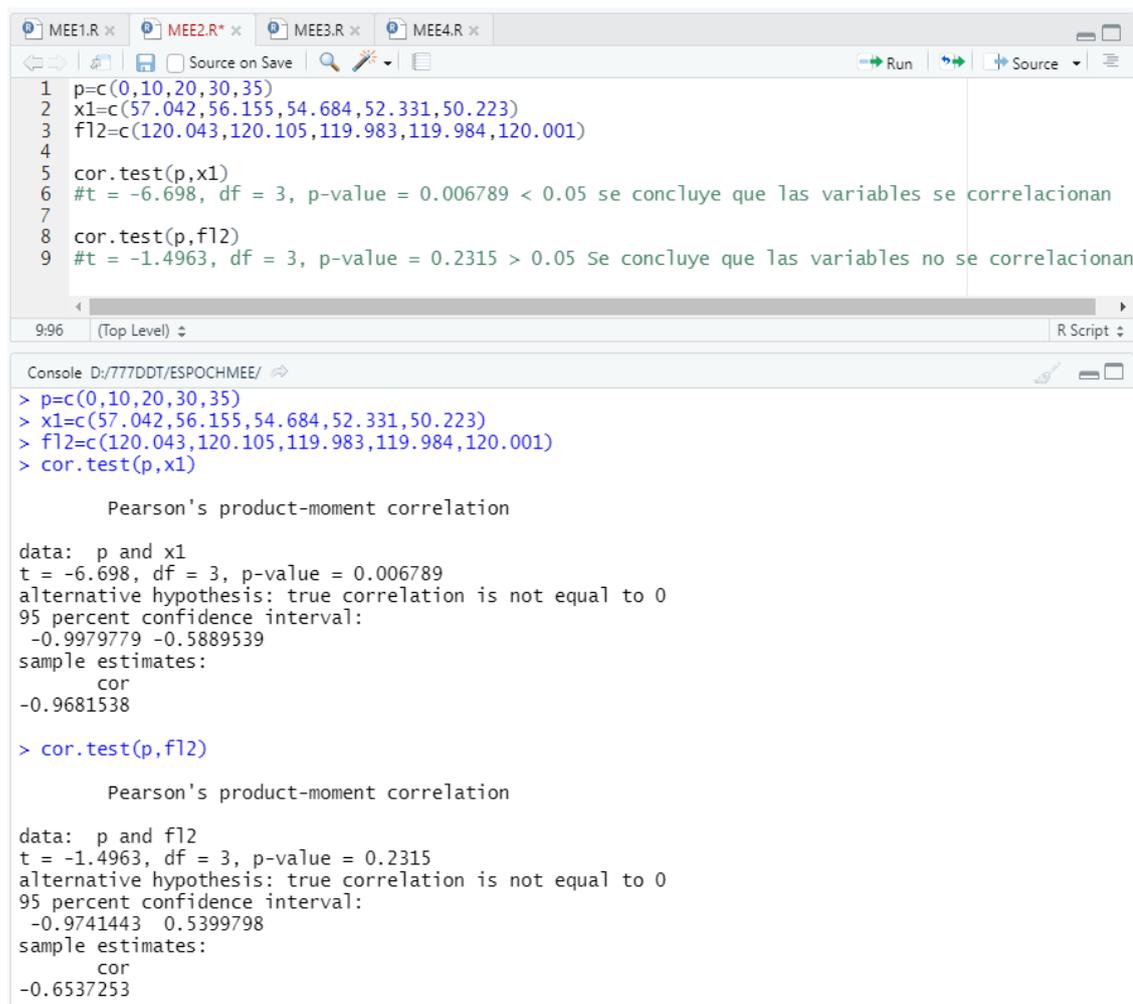
Realizado por: Gamarra, D.; Paca, J. 2022

En el correlograma del grafico 9-4, se observa el coeficiente de correlación de Pearson con un valor de -0,97 éste indica una correlación perfecta negativa entre las variables de presión (p) y frecuencia fundamental de rotación (x1), es decir, cuando se incrementa la presión disminuye la frecuencia x1.

Asimismo, se aprecia un valor de 0,61 mismo que al ser muy inferior al 1 indica que no hay correlación entre las variables de presión (p) y frecuencia característica de falla (f12), es decir, el incremento de la presión no influye en el valor la frecuencia f12.

Como ya se mencionó anteriormente, podemos evidenciar el color completamente azul entre las variables p y x1 dando a entender que hay correlación negativa, en el caso de las variables p y f12 el fondo no es completamente rojo lo que indica que no hay correlación.

4.4.2.2. Análisis de correlación de la bomba periférica 2



```
MEE1.R x MEE2.R* x MEE3.R x MEE4.R x
Source on Save Run Source
1 p=c(0,10,20,30,35)
2 x1=c(57.042,56.155,54.684,52.331,50.223)
3 f12=c(120.043,120.105,119.983,119.984,120.001)
4
5 cor.test(p,x1)
6 #t = -6.698, df = 3, p-value = 0.006789 < 0.05 se concluye que las variables se correlacionan
7
8 cor.test(p,f12)
9 #t = -1.4963, df = 3, p-value = 0.2315 > 0.05 Se concluye que las variables no se correlacionan

9:96 (Top Level) R Script

Console D:/777DDT/ESPOCHMEE/
> p=c(0,10,20,30,35)
> x1=c(57.042,56.155,54.684,52.331,50.223)
> f12=c(120.043,120.105,119.983,119.984,120.001)
> cor.test(p,x1)

Pearson's product-moment correlation

data: p and x1
t = -6.698, df = 3, p-value = 0.006789
alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0
95 percent confidence interval:
-0.9979779 -0.5889539
sample estimates:
cor
-0.9681538

> cor.test(p,f12)

Pearson's product-moment correlation

data: p and f12
t = -1.4963, df = 3, p-value = 0.2315
alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0
95 percent confidence interval:
-0.9741443 0.5399798
sample estimates:
cor
-0.6537253
```

Figura 15-4: Pruebas de correlación de la bomba periférica 2

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022

En la figura 15-4, mediante el cálculo se puede observar que el estadístico de prueba es $-6,698$ y el p-valor correspondiente de $0,006789$ mismo que es menor a $0,05$; lo que significa que existe una correlación de manera inversa entre las variables, dando a entender que el aumento de las presiones influye a la disminución considerable de las frecuencias fundamentales de rotación (1X).

En lo que respecta a las variables de presión y frecuencia característica de falla (2FL), el estadístico de prueba es $-1,4963$ y su p-valor respectivo de $0,2315$ mismo que es mayor a $0,05$ dando como resultado de que no existe la correlacionan entre ambas variables, es decir, no tienen relación lineal. Dicho de otro modo, la presión no afecta al valor de la variable 2FL de manera que es consistente con el modo de falla que tiene la bomba. Al igual que la bomba anterior el test de correlación se evalúa con un 95% de confianza para ambos casos.

De igual forma, para entender de mejor manera el coeficiente de correlación lineal de Pearson se procede a realizar el correlograma correspondiente para esta prueba de correlación.



Gráfico 10-4: Correlograma de la bomba periférica 2

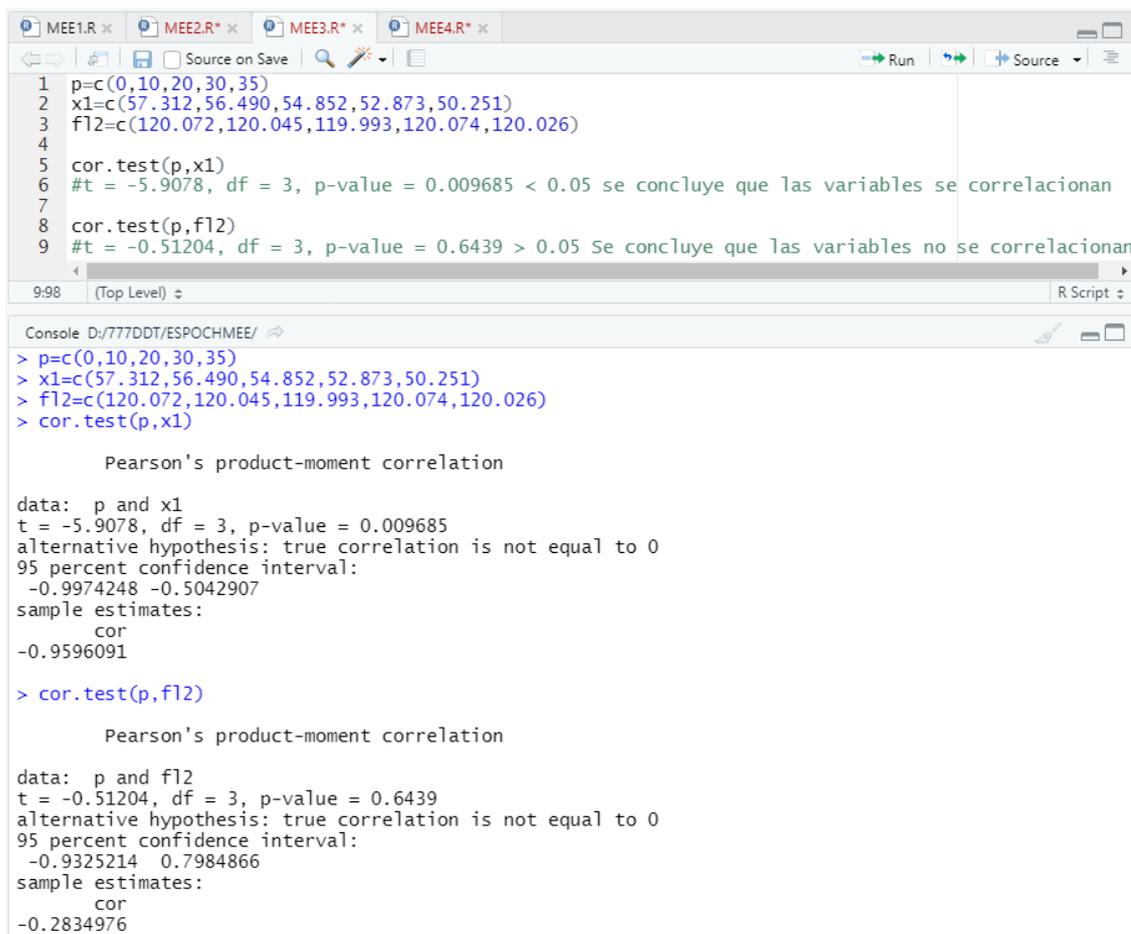
Realizado por: Gamarra, D.; Paca, J. 2022

En el correlograma del gráfico 10-4, se observa el coeficiente de correlación de Pearson con un valor de -0,97 mismo que indica una correlación perfecta negativa entre las variables de presión (p) y frecuencia fundamental de rotación (x1), en otras palabras, el aumento de la presión disminuye la frecuencia x1.

Es más, se aprecia un valor de -0,65 mismo que al ser muy inferior a 1 al mismo tiempo mayor a -1 indica que no hay correlación entre las variables de presión (p) y frecuencia característica de falla (f12), es decir, el aumento de la presión no influye en el valor la frecuencia f12.

Además, se evidencia que el color completamente azul entre las variables p y x1 da a entender que hay correlación negativa, en el caso de las variables p y f12 el fondo no es totalmente azul lo que indica que no hay correlación.

4.4.2.3. Análisis de correlación de la bomba periférica 3



```
MEE1.R x MEE2.R* x MEE3.R* x MEE4.R* x
Source on Save Run Source
1 p=c(0,10,20,30,35)
2 x1=c(57.312,56.490,54.852,52.873,50.251)
3 f12=c(120.072,120.045,119.993,120.074,120.026)
4
5 cor.test(p,x1)
6 #t = -5.9078, df = 3, p-value = 0.009685 < 0.05 se concluye que las variables se correlacionan
7
8 cor.test(p,f12)
9 #t = -0.51204, df = 3, p-value = 0.6439 > 0.05 Se concluye que las variables no se correlacionan
9:98 (Top Level) R Script

Console D:/777DDT/ESPOCHMEE/
> p=c(0,10,20,30,35)
> x1=c(57.312,56.490,54.852,52.873,50.251)
> f12=c(120.072,120.045,119.993,120.074,120.026)
> cor.test(p,x1)

Pearson's product-moment correlation
data: p and x1
t = -5.9078, df = 3, p-value = 0.009685
alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0
95 percent confidence interval:
-0.9974248 -0.5042907
sample estimates:
cor
-0.9596091

> cor.test(p,f12)

Pearson's product-moment correlation
data: p and f12
t = -0.51204, df = 3, p-value = 0.6439
alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0
95 percent confidence interval:
-0.9325214 0.7984866
sample estimates:
cor
-0.2834976
```

Figura 16-4: Pruebas de correlación de la bomba periférica 3

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022

En la figura 16-4, mediante el cálculo se puede observar que el estadístico de prueba es -5,9078 y el p-valor correspondiente de 0,009685 mismo que es menor a 0,05 lo que significa que existe una correlación de manera inversa entre las variables, dando a entender que el aumento de las presiones influye a la disminución considerable de las frecuencias fundamentales de rotación (1X).

En lo que respecta a las variables de presión y frecuencia característica de falla (2FL), el estadístico de prueba es -0,51204 y su p-valor respectivo de 0,6439 mismo que es mayor a 0,05 dando como resultado de que no existe la correlacionan entre ambas variables, es decir, no tienen relación lineal. Dicho de otro modo, la presión no afecta al valor de la variable 2FL de manera que es consistente con el modo de falla que tiene la bomba. En estos casos también, el test de correlación se evalúa con un 95% de confianza.

De modo similar al análisis de las bombas anteriores, para entender de mejor manera el coeficiente de correlación lineal de Pearson se procede a realizar el correlograma correspondiente para esta prueba de correlación.

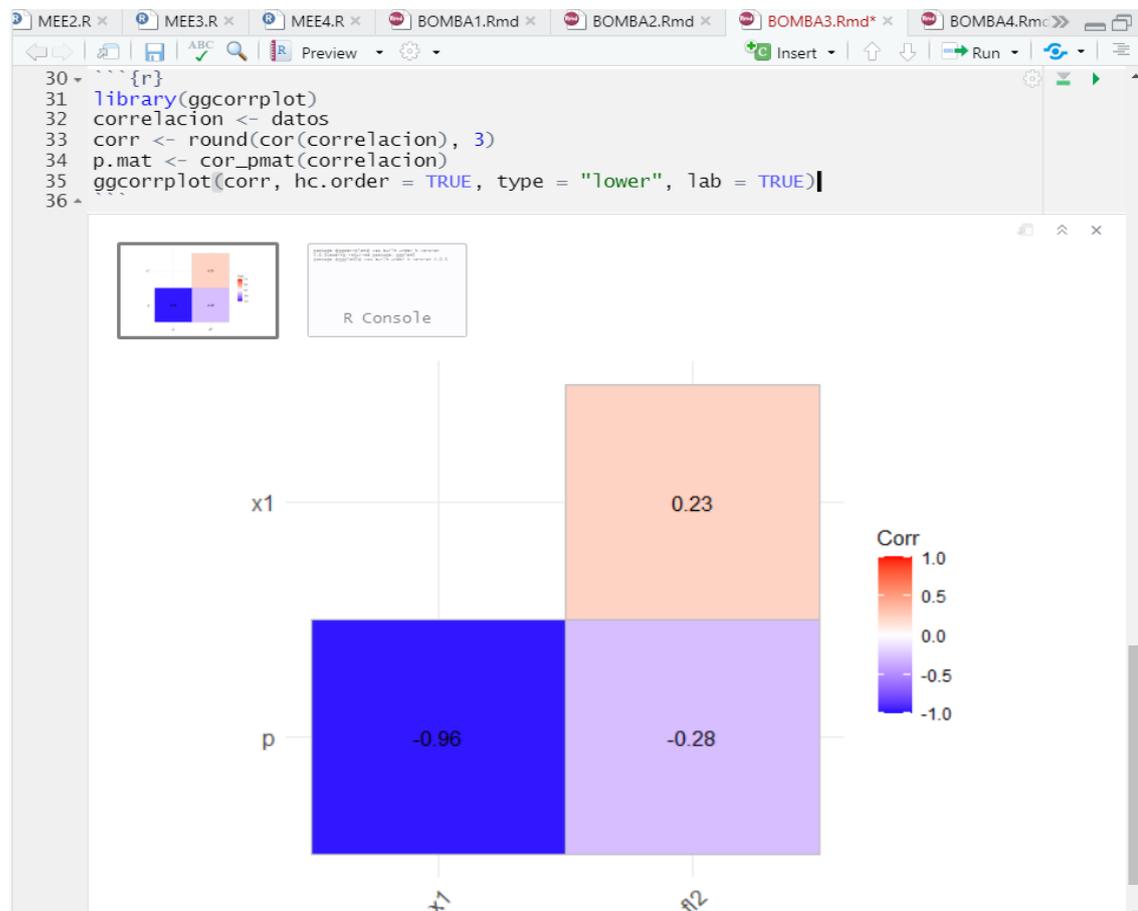


Gráfico 11-4: Correlograma de la bomba periférica 3

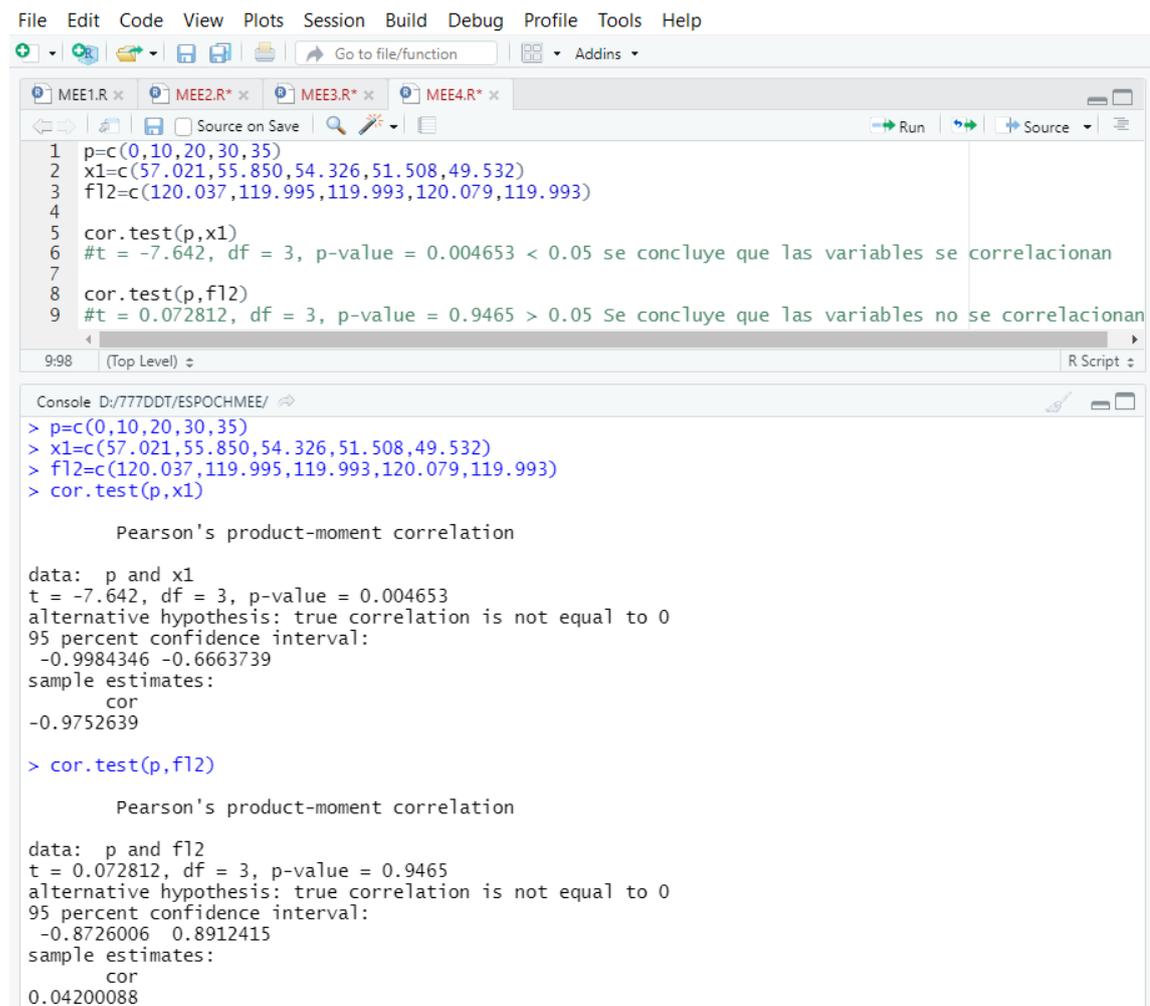
Realizado por: Gamarra, D.; Paca, J. 2022

En el correlograma del gráfico 11-4, se puede ver que el coeficiente de correlación de Pearson es -0,96 mismo que indica una correlación perfecta negativa entre las variables de presión (p) y frecuencia fundamental de rotación (x1), en otras palabras, el aumento de la presión disminuye la frecuencia x1.

Sobre todo, se aprecia un valor de -0,28 mismo que al ser menor a 1 y mayor a -1 indica que no hay correlación entre las variables de presión (p) y frecuencia característica de falla (f12), es decir, el aumento de la presión no influye en el valor la frecuencia f12.

Como ya se ha mencionado en casos anteriores, se evidencia que el color completamente azul entre las variables p y x1 da a entender que hay correlación negativa, en el caso de las variables p y f12 el fondo no es totalmente azul lo que indica que no hay correlación.

4.4.2.4. Análisis de correlación de la bomba periférica 4



```
File Edit Code View Plots Session Build Debug Profile Tools Help
+ Go to file/function
MEE1.R x MEE2.R x MEE3.R x MEE4.R x
Source on Save Run Source
1 p=c(0,10,20,30,35)
2 x1=c(57.021,55.850,54.326,51.508,49.532)
3 f12=c(120.037,119.995,119.993,120.079,119.993)
4
5 cor.test(p,x1)
6 #t = -7.642, df = 3, p-value = 0.004653 < 0.05 se concluye que las variables se correlacionan
7
8 cor.test(p,f12)
9 #t = 0.072812, df = 3, p-value = 0.9465 > 0.05 Se concluye que las variables no se correlacionan
9:98 (Top Level) R Script
Console D:/777DDT/ESPOCHMEE/
> p=c(0,10,20,30,35)
> x1=c(57.021,55.850,54.326,51.508,49.532)
> f12=c(120.037,119.995,119.993,120.079,119.993)
> cor.test(p,x1)

Pearson's product-moment correlation

data: p and x1
t = -7.642, df = 3, p-value = 0.004653
alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0
95 percent confidence interval:
-0.9984346 -0.6663739
sample estimates:
cor
-0.9752639

> cor.test(p,f12)

Pearson's product-moment correlation

data: p and f12
t = 0.072812, df = 3, p-value = 0.9465
alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0
95 percent confidence interval:
-0.8726006 0.8912415
sample estimates:
cor
0.04200088
```

Figura 17-4: Pruebas de correlación de la bomba periférica 4

Realizado por: Gamarra D.; Paca J. 2022

Del mismo modo en la figura 17-4, del cálculo se puede observar que el estadístico de prueba es -7,642 y el p-valor correspondiente de 0,004653; siendo este último valor menor a 0,05 lo que significa que existe una correlación de manera inversa entre las variables, lo que indica que las frecuencias fundamentales de rotación (1X) se disminuyen al incrementar la presión o carga.

En cuanto a las variables de las presiones y las frecuencias características de falla, el estadístico de prueba es 0,072812 y su p-valor respectivo de 0,9465 mismo que es mayor a 0,05 el cual determina de que no hay la correlacionan entre ambas variables, es decir, no tienen relación lineal. En otras palabras, la presión no afecta en el valor de la variable 2FL, por lo que un aumento en la presión no provoca un cambio en la frecuencia característica de falla de modo que es consistente con el modo de falla que tiene la bomba. Al igual que al resto de las bombas periféricas el test de correlación se evalúa con un 95% de confianza para ambos casos.

De modo similar al análisis de las bombas 1,2 y 3, para entender de mejor manera el coeficiente de correlación lineal de Pearson se procede a realizar el correlograma correspondiente para esta prueba de correlación.

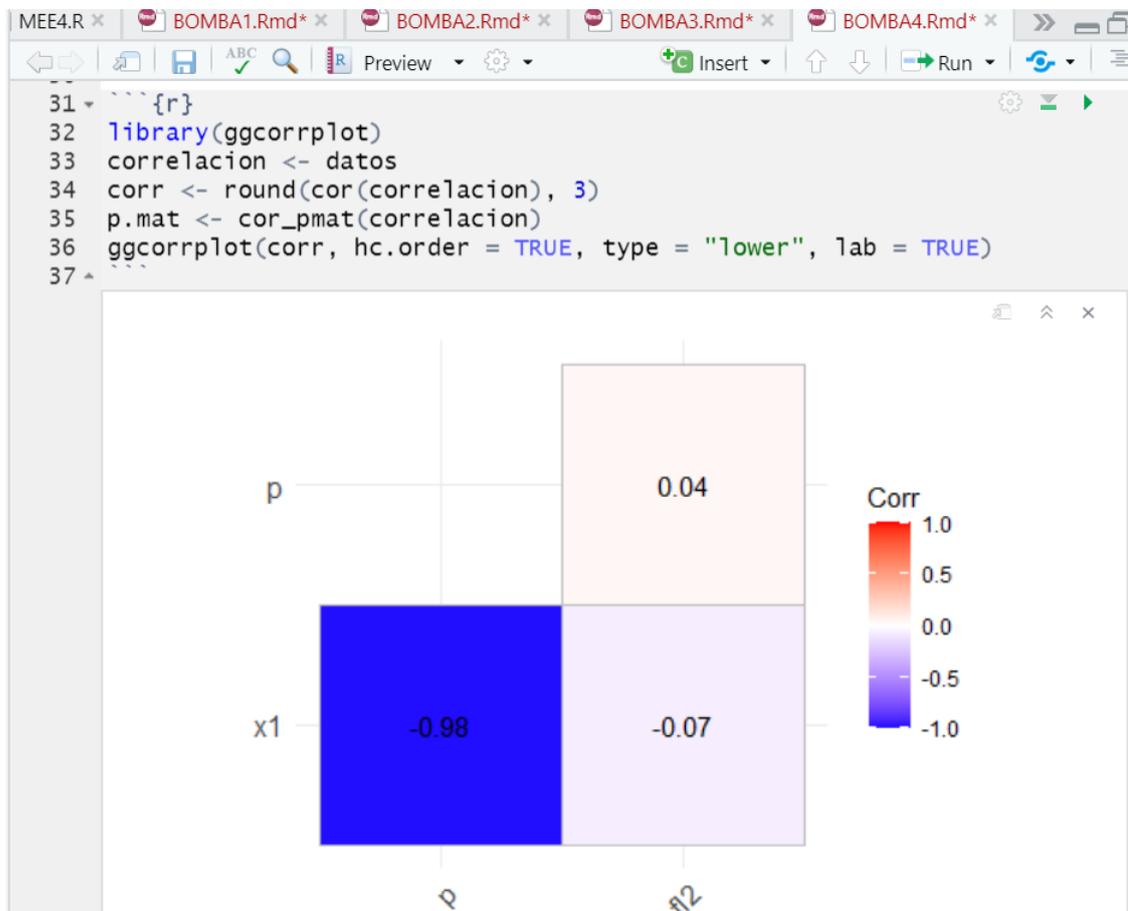


Gráfico 12-4: Correlograma de la bomba periférica 4

Realizado por: Gamarra, D.; Paca, J. 2022

En el correlograma del gráfico 12-4, se puede observar que el coeficiente de correlación de Pearson es -0,98 mismo que indica una correlación perfecta negativa entre las variables de presión (p) y frecuencia fundamental de rotación (x1), en otras palabras, el incremento de la presión disminuye la frecuencia x1.

Sobre todo, se aprecia un valor de 0,04 mismo que al estar muy por debajo de 1 indica que no hay correlación entre las variables de presión (p) y frecuencia característica de falla (f12), es decir, el aumento de la presión no influye en el valor la frecuencia f12.

Como ya se ha mencionado en casos anteriores, también se evidencia que el color completamente azul entre las variables p y x1 da a entender que hay correlación negativa, en el caso de las variables p y f12 el fondo no es totalmente rojo lo que indica que no hay correlación.

CONCLUSIONES

Se implementó el módulo de simulación para el diagnóstico vibracional de la excentricidad estática de un motor de inducción para el Rotor Kit del laboratorio de Diagnóstico Técnico y Eficiencia Energética; ya que cumple con la función para la cual fue implementada, el cual garantiza una visualización clara mediante el análisis espectral de vibraciones mecánicas que el motor de inducción tiene una excentricidad estática de forma permanente a una frecuencia de 120 Hz, adquirido a través del software MAINTraQ Predictive y el colector de vibraciones Vibracheck ABG-200.

Se seleccionó los criterios y requerimientos técnicos que describen las características del módulo de simulación tales como la potencia del motor de 0,37kW, un sistema cerrado en succión positiva, el fluido refrigerante seguro y económico, la estructura metálica de acero al carbono SAE 1010 y los accesorios PVC para el transporte de fluido, los cuales permitió la construcción del módulo en perfectas condiciones de operación y funcionamiento.

Se construyó los módulos de simulación tal cual el diseño realizado en el software SolidWorks Académico con sus medidas exactas, con materiales de calidad y su respectivo mecanizado de todas las partes que consta el banco de pruebas, utilizando los equipos de protección personal para resguardar la integridad física al utilizar maquinas herramientas como son el torno, tronadora, soldadura y rectificadora, dejando como resultado un equipo 100% funcional para simular la detección vibracional de la excentricidad estática en los motores de inducción mediante la estrangulación del fluido a la bomba a través de la válvula de descarga variando la carga de 0 a 35psi.

Se determinó las frecuencias naturales de las bombas periféricas mediante el software MAINTraQ Viewer con el módulo apagado y el fluido en reposo por todo el sistema cerrado, las frecuencias naturales obtenidas oscilan en un rango de 33 y 39 Hz encontrándose por debajo de las frecuencias de funcionamiento (1X) que rondan en un rango de 49 a 58 Hz, por lo tanto, los módulos trabajarán sin entrar en resonancia.

Se verificó que el armónico de la frecuencia característica de falla es correspondiente al doble de la frecuencia de línea (2FL), es decir, que los armónicos del espectro de velocidad permanecen de manera constante sin variar en el dominio de la frecuencia de 120 Hz aun cuando se varía las cargas en el motor. Dicho en otras palabras, la presión no afecta en el valor de la variable 2FL, por lo que un aumento en la presión o carga no provoca un cambio en la frecuencia característica

de falla de modo que es consistente con el modo de falla que tiene la bomba. Este estudio se evaluó mediante el test de correlación con una confianza del 95%, mismo que, el p-valor fue mayor a 0,05 dando como conclusión de que no existe la correlación entre las variables presión y 2FL.

La elaboración del manual de operación integra las actividades de manejo y funcionamiento del módulo de simulación, es decir, el montaje correcto, conocimiento de sus partes constituyentes, conectar y encender el módulo, instalar equipos de medición y la toma de datos. Además, se llevó a cabo la realización del Plan de Mantenimiento mediante la metodología AMEF siendo el método más apropiado para el módulo de simulación en la fase de diseño para mejorar la seguridad del operador, la confiabilidad y la robustez del módulo.

Finalmente, se realizó una guía práctica de laboratorio mediante varios ensayos de diagnóstico vibracional de excentricidad estática en el banco de pruebas, resultando ser un aporte beneficioso para el estudiante y docente que necesiten encontrar una solución rápida sobre el manejo adecuado del módulo en el área de diagnóstico técnico.

RECOMENDACIONES

Antes de poner en funcionamiento al módulo de simulación, es necesario realizar una revisión rápida del módulo completo puesto que se constituye de elementos de tipo industrial tales como la bomba periférica, válvulas de succión y descarga, manómetro, tuberías y accesorios, así también, la fuente de alimentación en el tablero de control conectada a una red de alimentación de corriente alterna.

Los módulos de simulación deben manejarse con mucho cuidado al momento de aplicar cargas mediante la válvula de descarga para evitar daños en los equipos que pueden causar incidentes al operario, ya que la máxima carga experimentada en dichos módulos es de 35 psi, al exceder esta presión el tiempo de trabajo deberá ser el menor posible ya pueden originar problemas en el módulo especialmente en la bomba periférica.

Para realizar las prácticas de laboratorio, la carrera de Mantenimiento Industrial deberá equiparse de más equipos de diagnóstico y módulos de simulación para cubrir todas las necesidades de los estudiantes y docentes en el área de mantenimiento basado en la condición y diagnóstico técnico.

Se recomienda a los estudiantes, profesores y técnicos de laboratorio estar al tanto del avance tecnológico y las investigaciones futuras sobre los nuevos equipos de diagnóstico y métodos de diagnóstico para detectar fallas en máquinas rotativas con el fin de evaluar el estado de funcionamiento.

BIBLIOGRAFÍA

ALLAUCA ALLAUCA, Alex Fernando, & PAGUAY ASHQUI, Alex Geovanny. Implementación de un módulo de simulación de puente grúa comandado por relés programables y variadores de frecuencia [En línea] (Trabajo de titulación). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Mantenimiento Industrial. Ecuador. 2019. pp. 10-11. [Consulta: 2021-06-10]. Disponible en: <http://dspace.espech.edu.ec/bitstream/123456789/11579/1/25T00361.pdf>.

BUDYNAS, Richard; & NISBETT, Keith. *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. 9ª ed. México: The McGraw-Hill, 2012. ISBN 978-607-15-0771-6, p.1004.

BURGUEÑO, Agustín, MERCADANTE, Carlos, & NÚÑEZ, Bruno. Detección de excentricidad en máquinas de inducción [En línea] (Pregrado). Universidad de la República, Facultad de Ingeniería. Uruguay. 2017. pp. 16-17. [Consulta: 2021-05-25]. Disponible en: <https://ie.fing.edu.uy/publicaciones/2017/BMN17/BMN17.pdf>.

CHAPMAN, S. J. *Máquinas Eléctricas*. 5ª ed. Monterrey-México: The McGraw-Hill, 2012. ISBN 978-607-15-0724-2, p. 20.

CHARLOTTE, B. *Cartas de Charlotte* [en línea]. U.S.A.: Technical Associates Of Charlotte, 1996. [Consulta: 9 enero 2022]. Disponible en: <https://www.studocu.com/cl/document/universidad-tecnica-federico-santa-maria/ingenieria-del-mantenimiento/carta-de-charlotte/7365322>.

CHUNGWEI, Lin, LEI, Zhou, BINGNAN, Wang, HIROSHI, Inoue, & MASAHITO, Miyoshi. "Static Eccentricity Fault Detection for PSH-type Induction Motors Considering High-order Air Gap Permeance Harmonics". *International Electric Machine & Drives Conference (IEMDC)* [en línea], 2021, (Hartford, CT, USA), p. 1. [Consulta: 15 diciembre 2021]. ISSN 2069-7112. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9449496>.

CONTRERAS ALVAREZ, José Luis. Diseño de un modelo para mantenimiento predictivo en motores de inducción utilizando técnicas de la Industria 4.0 [En línea] (Trabajo de titulación). Universidad Tecnológica de Perú, Facultad de Ingeniería, Mecatrónica. Lima-Perú. 2020. pp. 10-11. [Consulta: 2021-12-15]. Disponible en: https://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12867/4275/Jose_Contreras_Tesis

[Titulo Profesional 2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y.](#)

CORZOSA. *Rectificadoras industriales* [blog]. 2021. [Consulta: 16 agosto 2021]. Disponible en: **<https://www.corzosa.com/rectificadoras-industriales/>**.

ESTATOLOGOS. *Cómo realizar una prueba de correlación* [blog]. 2022. [Consulta: 15 febrero 2022]. Disponible en: **<https://statologos.jaol.net/test-de-correlacion-en-excel/>**.

FERNÁNDEZ VILLAFÁÑEZ, José Ignacio. Diagnóstico de Fallos en Rodamientos de Motores Eléctricos Mediante Técnicas Lasso [En línea] (Trabajo de titulación). (Pregrado) Universidad de Valladolid, Ingenierías Industriales. España. 2018. p. 33. [Consulta: 2021-06-13]. Disponible en: **<https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/30854/TFG-I-849.pdf;jsessionid=20CA45C9F7DAC40D4258D79760A13452?sequence=1>**.

FLORES, Roberto, & ASIAÍN, Tomás. "Diagnóstico de Fallas en Máquinas Eléctricas Rotatorias Utilizando la Técnica de Espectros de Frecuencia de Bandas Laterales". *Información Tecnológica de Ingeniería Eléctrica* [en línea], 2021, (D.F., México) 22(4), p. 78. [Consulta: 15 diciembre 2021]. Disponible en: **<https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v22n4/art09.pdf>**.

GALLEGOS DEL POZO, Carlos. Mantenimiento predictivo en motores de inducción aplicando técnicas de inteligencia artificial y teoría de desequilibrios electromagnéticos [En línea] (Trabajo de titulación). (Maestría) Universidad de Valladolid, Ingeniería Industrial. España. 2018. pp. 1-5. [Consulta: 2022-03-27]. Disponible en: **<https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/32462/TFM-I-976.pdf?sequence=1&isAllowed=y>**.

GARCÍA SANTAMARÍA, Cristina. Análisis espectral de señales para la detección de fallos de motores de inducción [En línea] (Trabajo de titulación). (Pregrado) Universidad de Valladolid, Ingenierías Industriales, Ingeniería Eléctrica. España. 2017. pp. 54-55. [Consulta: 2021-06-15]. Disponible en: **<https://library.co/document/7q0vrvgz-analisis-espectral-senales-deteccion-fallos-motores-induccion.html>**.

GARFIAS NIETO, Luis Enrique. Monitoreo y Análisis de Vibraciones en Motores de Inducción de Fallas de Cortocircuito [En línea] (Trabajo de titulación). Universidad Autónoma De Querétaro, Ingeniería Mecánica Eléctrica. Querétaro-Mexico. 2021. pp. 31-32. [Consulta: 2021-12-15]. Disponible en: **<http://ri-ng.uaq.mx/bitstream/123456789/2617/1/IGLIN-240973-0920-1128-Luis Enrique Garfias Nieto compressed -A.pdf>**.

GRANADOS ROMERO, Raúl. Diagnóstico de fallos en el rotor de motores eléctricos en estado transitorio mediante técnicas estadísticas [En línea] (Trabajo de titulación). (Pregrado) Universidad de Valladolid, Ingenierías Industriales, Organización Industrial. Valladolid-España. 2017. p. 21. [Consulta: 2021-06-13]. Disponible en: <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/25959>.

HERNÁNDEZ, Omar de la Cruz. Diagnóstico de fallas de excentricidad en motores de inducción por el espectro de frecuencia de la corriente del estator [En línea] (Trabajo de diploma). Instituto Superior Minero Metalúrgico De Moa, Metalurgia Electromecánica, Ingeniería Eléctrica. Moa-Holguín. 2016. p. 23. [Consulta: 2021-05-29]. Disponible en: <http://ninive.ismm.edu.cu/bitstream/handle/123456789/1881/DelaCruzHdez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

HERRERA GUACHAMIN, Jonathan Giovanny. Análisis de la Eficiencia de los Motores de Inducción que Operan Bajo Diferentes Condiciones de Fallos [En línea] (Trabajo de titulación). (Máster) Universidad Politécnica de Valencia, Técnico Superior de Ingeniería del Diseño, Ingeniería del Mantenimiento. Valencia-España. 2018. p. 7. [Consulta: 2022-03-04]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/113390/Herrera - Análisis de la eficiencia de los motores de inducción que operan bajo diferentes condic....pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

HERRERA MORALES, Carlos Alberto. Detección de fallas en motores asincrónicos mediante métodos de diagnóstico no invasivos [en línea] (Trabajo de diploma). Universidad Central Marta Abreu de las Villas, Ingeniería Eléctrica, Electroenergética. Santa Clara-Cuba. 2018. pp. 1-37. [2021-05-25]. Disponible en: [https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/9823/Carlos Alberto Herrera Morales.pdf](https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/9823/Carlos_Alberto_Herrera_Morales.pdf).

ISO 14224. *Industrias de petróleo, petroquímica y gas natural recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos.*

KELJIK, J. *Electricidad 4 Motores de CA/CC, Controles y Mantenimiento* [en línea]. Buenos Aires-Argentina: Cengage Learning, 2011. [Consulta: 11 junio 2021]. Disponible en: <https://elibro.net/es/ereader/epoch/76611>.

LALINDE, Juan, ESPINOSA, Jhon, PEÑALOZA, Mariana, & Rodriguez Johel. "Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson". *Definición, propiedades y suposiciones* [en línea], 2018, (Colombia), p. 1. [Consulta: 15 febrero 2022]. Disponible en:

<https://bonga.unisimon.edu.co/handle/20.500.12442/2469>.

MACHUCA, S., & VARGAS, F. *Máquinas Eléctricas Rotativas* [en línea]. Lima-Perú: Megaprint Ediciones, 1990. [Consulta: 9 junio 2021]. Disponible en: **http://repositorio.pucp.edu.pe/index/bitstream/handle/123456789/28690/maquinas_electricas_rotativas.pdf?sequence=1&isAllowed=y**.

MALAGA. *Pegatanke adhesivo Epoxi transparente 32GR* [blog]. 2020. [Consulta: 28 febrero 2022]. Disponible en: **<http://www.ferreteriamalaga.com/4191-pegatanke-adhesivo-epoxi-transparente-32gr.html>**.

MARTINEZ, María, & DIX, Verónica. "Detección de fallas en rodamientos de un motor de inducción trifásico tipo jaula de ardilla empleando análisis de vibraciones". *Análisis de vibraciones* [en línea], 2017, (Colombia), p. 18. [Consulta: 11 junio 2021]. Disponible en: **<http://vitela.javerianacali.edu.co/handle/11522/8418>**.

MORA CEVALLOS, Anderson Xavier. Análisis de la efectividad de los modelos mixtos de diagnóstico técnico en motores eléctricos trifásicos asincrónicos jaula de ardilla del laboratorio de mantenimiento predictivo de la Facultad de Mecánica de la ESPOCH [En línea] (Trabajo de titulación). Escuela Superior Politécnica De Chimborazo, Mecánica, Ingeniería de Mantenimiento. Riobamba-Ecuador. 2016. pp. 5-23. [Consulta: 2021-05-15]. Disponible en: **<http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/6458/1/25T00283.pdf>**.

PALOMINO MARÍN, Evelio. *Elementos de Medición y Análisis de Vibraciones en Máquinas Rotatorias*. 5ª ed. Cuba: 2007. ISBN 959-261-043-6, pp. 92-147.

PLATERO, Carlos, GYFTAKIS, Konstantinos, & ZHANG, Yucheng. "Diagnosis of Static Eccentricity in 3-Phase Synchronous Machines using a Pseudo Zero-Sequence Current". *Energies* [en línea], 2019, (Madrid-Spain), pp. 2-4. [Consulta: 14 June 2021]. Disponible en: **<https://sci-hubtw.hkvisa.net/10.3390/en12132476>**.

RIVERO COLLANTES, Carlos. *Monitorización del entrehierro en motores y generadores* [blog]. 29 Septiembre, 2020. [Consulta: 11 junio 2021]. Disponible en: **<https://power-mi.com/es/content/monitorización-del-entrehierro-en-motores-y-generadores>**.

SIEMENS. *Motores Siemens* [blog]. 2019. [Consulta: 10 junio 2021]. Disponible en: **https://issuu.com/fassaeficiencia/docs/motores_trif_sicos_siemens**.

SOLIDWORKS ACADÉMICO. *Introducción SolidWorks para estudiantes* [blog]. 2020. [Consulta: 29 junio 2021]. Disponible en: https://my.solidworks.com/solidworks/guide/SOLIDWORKS_Introduction_ES.pdf.

VALENCIA MEJIA, Eduardo Patricio. Metodología para el diagnóstico de fallas en motores de inducción de baja tensión por el espectro de frecuencia de la corriente del estator [En línea] (Trabajo de titulación). Universidad Técnica Del Norte, Ingeniería en Ciencias Aplicadas, Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico. Ibarra-Ecuador. 2018. pp. 9-31. [Consulta: 2021-05-25]. Disponible en: <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/8478/1/04%20MEL%20036%20TRABAJO%20DE%20GRADO.pdf>

WISSAM, Dehina, BOUMEHRAS, Mohamed, KRATZ, Frédéric, & FANTINI, Jacques. "Diagnosis and Comparison between Stator Current Analysis and Vibration Analysis of Static Eccentricity Faults in The Induction Motor". *The 4th International Conference on Power Electronics and their Application* [en línea], 2019, (Turkey), pp. 1-5. [Consulta: 29 mayo 2021]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8911193>.

ANEXOS

ANEXO A: DISEÑO DEL MÓDULO DE SIMULACIÓN DE EXCENTRICIDAD ESTÁTICA.

ANEXO B: MANUAL DE MANTENIMIENTO.

ANEXO C: GUÍA PRÁCTICA DE LABORATORIO.