



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO**

**“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”**

MORA CEVALLOS ANDERSON XAVIER

TRABAJO DE TITULACIÓN

Para la obtención de título de:

INGENIERO DE MANTENIMIENTO

RIOBAMBA-ECUADOR

2016

ESPOCH

Facultad de Mecánica

APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

2015-10-08

Yo recomiendo que el Trabajo de Titulación preparado por:

MORA CEVALLOS ANDERSON XAVIER

Titulado:

**“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”**

Sea aceptado como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

INGENIERO DE MANTENIMIENTO

Ing. Carlos José Santillán Mariño
DECANO FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Eduardo Segundo Hernández Dávila
TUTOR

Ing. Marco Heriberto Santillán Gallegos
ASESOR

ESPOCH

Facultad de Mecánica

EXAMINACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: MORA CEVALLOS ANDERSON XAVIER

TRABAJO DE TITULACIÓN: “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”

Fecha de Examinación: 2016-12-16

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. César Eduardo Astudillo Machuca PRESIDENTE TRIB. DEFENSA			
Ing. Eduardo Segundo Hernández Dávila TUTOR			
Ing. Marco Heriberto Santillán Gallegos ASESOR			

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Ing. César Eduardo Astudillo Machuca
PRESIDENTE TRIB. DEFENSA

DERECHOS DE AUTORIA

El presente Trabajo de Titulación, es original y basado en el proceso de investigación establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos-científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad del autor. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Mora Cevallos Anderson Xavier

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Mora Cevallos Anderson Xavier, declaro que el presente Trabajo de Titulación es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente, están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Titulación.

Mora Cevallos Anderson Xavier
Cédula de Identidad: 0503488157

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico con mucho cariño a mi amada familia, que día tras día se han esforzado en el afán de verme crecer como profesional y ser humano, en cada acierto y error nunca me he sentido solo, el abrigo de ellos me ha dado la fortaleza para seguir adelante alcanzando mis metas y objetivos en la vida.

Susana, madrecita siempre con su preocupación y entrega, en el afán de verme cómodo y atendido en todo sentido aunque renunciaste a muchas cosas que las mereces mucho más que yo, gracias mamita por cada sacrificio y lágrima derramada por mí.

Ligia, hermana y compañera mía, en cada uno de mis días grises siempre tu presente con un acertado consejo para mí, la gracia con la que resolvemos nuestras diferencias y las metas mutuas fueron el impulso perfecto para alcanzar este logro.

Mario, amado padre y mejor amigo, las palabras me resultan muy limitadas para expresar el eterno agradecimiento, cariño y admiración que siento, gracias por ser siempre el eje fundamental de cada paso grande o pequeño que he logrado dar en la vida, sin ti no lo hubiese logrado, amor y gratitud hasta siempre.

Anderson Xavier Mora Cevallos

AGRADECIMIENTO

Fundamentalmente agradezco a Dios, por haberme dado la salud, cuidado y sabiduría, necesarios para luchar cada momento de mi vida y mediante aquello alcanzar la meta de este presente logro académico.

Un especial agradecimiento a todos los amigos y familiares que creyeron en mí, que siempre estuvieron detrás de mi proceso académico, amigos fieles como el Sr. Milton Rivera, Ing. Eduardo Hernández, siempre impartieron desinteresadamente su conocimiento y apoyo, mi amada Leslye Sánchez, te llevaré en mi mente y corazón por el sentimiento y cariño que fueron mi inspiración para caminar hacia el frente, gracias por las bendiciones derramadas por mis familiares cercanos.

Finalmente expreso gratitud a mi querida escuela de Ingeniería de Mantenimiento, al personal administrativo y plantilla docente, que impartieron sus conocimientos técnicos y personales, permitiéndome formar parte de esta notoria profesión.

Anderson Xavier Mora Cevallos

CONTENIDO

Pág.

1.	INTRODUCCIÓN	
1.1	Antecedentes	1
1.2	Justificación.....	2
1.3	Objetivos.....	3
1.3.1	<i>Objetivo general.</i>	3
1.3.2	<i>Objetivos específicos</i>	3
2.	MARCO REFERENCIAL	
2.1	Motor de inducción trifásica de jaula de ardilla asincrónico	5
2.1.1	Clasificación de los motores comerciales de inducción por sus propiedades eléctricas y mecánicas.....	6
2.1.2	<i>Principios de funcionamiento</i>	6
2.1.2.1	<i>Campo giratorio.</i>	7
2.1.2.2	<i>Entrehierro.</i>	9
2.1.2.3	<i>Deslizamiento y su medida.</i>	9
2.2	Fallos en motores eléctricos.....	10
2.2.1	<i>Fallas en el rotor por barras rotas.</i>	10
2.2.1.1	<i>Defectos en el núcleo del rotor.</i>	11
2.2.2	<i>Excentricidad.</i>	11
2.2.2.1	<i>Excentricidad estática.</i>	11
2.2.2.2	<i>Excentricidad dinámica.</i>	12
2.3	Mantenimiento predictivo para motores de jaula de ardilla.....	14
2.3.1	<i>Diagnósticos técnicos empleados para la detección de modos de falla.</i>	14
2.3.1.1	<i>Diagnóstico por análisis de vibraciones mecánicas.</i>	15
2.3.1.2	<i>Diagnóstico por análisis espectral de las corrientes del estator.</i>	16
2.3.2	<i>Diagnostico técnico en motor con barras rotas.</i>	17
2.3.2.1	<i>Análisis de vibraciones mecánicas generadas por barras rotas.</i>	17
2.3.2.2	<i>Análisis de la corriente del estator en barras rotas.</i>	19
2.3.3	<i>Diagnostico técnico en motor con excentricidad estática</i>	21
2.3.3.1	<i>Análisis de vibraciones mecánicas generadas por excentricidad estática.</i>	21
2.3.3.2	<i>Análisis de la corriente del estator con excentricidad estática.</i>	22
2.3.4	<i>Analizador de vibraciones mecánicas.</i>	23
2.3.4.1	<i>La transformada rápida de Fourier (FFT).</i>	24
2.3.5	<i>Acelerómetro piezo-eléctrico.</i>	25
3.	CRITERIOS DE SELECCIÓN Y MONTAJE DE SIMULADORES DE FALLAS	
3.1	Sistema del módulo de pruebas	26
3.2	Criterios de selección de sistemas para módulo simulador con barras rotas..	28
3.2.1	<i>Selección de sistema de potencia para modulo con barras rotas.</i>	28
3.2.2	<i>Selección de sistema de carga.</i>	29
3.2.3	<i>Selección de sistema de transmisión.</i>	31
3.2.4	<i>Selección de polea.</i>	31

3.2.5	<i>Selección de la correa de transmisión.....</i>	33
3.2.6	<i>Selección de sistema eléctrico.....</i>	35
3.2.7	<i>Regulador de voltaje.....</i>	36
3.2.8	<i>Carga adicional.....</i>	36
3.3	<i>Criterios de selección de sistemas para módulo simulador con excentricidad estática permanente.....</i>	37
3.3.1	<i>Selección de sistema de potencia para módulo con excentricidad estática permanente.....</i>	37
3.3.2	<i>Selección de sistema de carga para motobomba centrífuga.....</i>	38
3.3.3	<i>Selección de elementos de transporte de fluido y elementos de control.....</i>	38
3.3.4	<i>Selección de elementos eléctricos.....</i>	39
3.3.5	<i>Selección de fluido a mover.....</i>	40
3.3.6	<i>Selección de material para estructura de soporte.....</i>	41
3.4	<i>Cálculo de potencia.....</i>	41
3.4.1	<i>Cálculo de la potencia para motor con barras rotas.....</i>	41
3.4.2	<i>Cálculo de potencia para bomba con excentricidad estática permanente.....</i>	46
3.4.2.1	<i>Test de medida de variables en motobomba con diferentes cargas.....</i>	47
3.5	<i>Construcción de módulos simuladores de falla.....</i>	48
3.5.1	<i>Motor con barras rotas.....</i>	48
3.5.1.1	<i>Instalación eléctrica en motor con barras rotas.....</i>	50
3.5.1.2	<i>Puntos de medición en motor con barras rotas.....</i>	50
3.5.1.3	<i>Base o chasis de montaje para modulo con barras rotas.....</i>	51
3.5.1.4	<i>Montaje de elementos en módulo de barras rotas.....</i>	52
3.5.2	<i>Motobomba con presencia de excentricidad estática permanente.....</i>	55
3.5.2.1	<i>Instalación eléctrica en motobomba con excentricidad estática.....</i>	56
3.5.2.2	<i>Puntos de medición en motobomba con excentricidad estática.....</i>	57
3.5.2.3	<i>Base para montaje de modulo con excentricidad estática.....</i>	57
3.5.2.4	<i>Montaje de elementos en módulo con excentricidad estática.....</i>	58
4.	MEDICCIÓN Y ANÁLISIS DE VARIABLES	
4.1	<i>Metodología para pruebas.....</i>	60
4.1.1	<i>Calibración de la potencia de entrada.....</i>	60
4.1.2	<i>Mediciones en motores.....</i>	61
4.1.2.1	<i>Mediciones sin falla.....</i>	61
4.1.2.2	<i>Mediciones con falla.....</i>	63
4.1.3	<i>Configuración de software.....</i>	65
4.2	<i>Análisis en motor con barras rotas.....</i>	66
4.2.1	<i>Espectro de vibraciones mecánicas en máquina sana.....</i>	66
4.2.2	<i>Espectro de la corriente del estator en máquina sana.....</i>	67
4.2.3	<i>Espectro de vibraciones mecánicas con barras rotas.....</i>	68
4.2.4	<i>Espectro de la corriente del estator con barras rotas.....</i>	71
4.3	<i>Análisis de motor bomba con excentricidad estática permanente.....</i>	73
4.3.1	<i>Espectro de vibraciones mecánicas en motor de bomba con excentricidad estática permanente.....</i>	74
4.3.1.1	<i>Espectro de velocidad de la vibración en bomba con máxima carga.....</i>	75
4.3.2	<i>Espectro de la corr. de alim. motor con excentricidad permanente.....</i>	77
4.3.2.1	<i>Espectro de la corriente de alimentación en motor con excentricidad permanente a máxima carga.....</i>	78

5.	ANÁLISIS Y RESULTADOS	
5.1	Resultados en análisis de barras rotas.....	81
5.1.1	<i>Resultados de vibraciones mecánicas en ensayo de barras rotas.</i>	81
5.1.2	<i>Resultados de espectro de la corriente en ensayo de barras rotas.</i>	82
5.2	Resultados en análisis de excentricidad estática permanente (bomba)	83
5.2.1	<i>Resultados de vibraciones mec. en ensayo de exc. estática permanente.</i>	83
5.2.1.1	<i>Análisis de frecuencia en vibraciones mecánicas</i>	83
5.2.1.2	<i>Análisis de amplitud en vibraciones mecánica.</i>	85
5.2.2	<i>Resultados de análisis de la corriente en ensayo de excentricidad estática permanente.</i>	86
5.2.2.1	<i>Análisis de frecuencia en análisis de corriente del estator.</i>	86
5.2.2.2	<i>Análisis de amplitud en análisis de corriente del estator.</i>	87
5.3	Análisis de efectividad de los tipos de diagnóstico técnico.....	89
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
6.1	Conclusiones	90
6.2	Recomendaciones	90

BIBLIOGRAFÍA
ANEXOS

LISTA DE TABLAS

	Pág.
1. Características de los motores comerciales de inducción jaula de ardilla.....	6
2. Requerimientos para simulador de falla barras rotas	26
3. Requerimientos para simulador de falla excentricidad estática permanente.....	27
4. Datos técnicos de motor	29
5. Valores de test computacional del alternador.....	30
6. Corriente de salida a prueba con 13,5 voltios	30
7. Especificaciones de tipo de bandas	34
8. Fragmento de especificaciones de correa A26	34
9. Tabla de calibres para conductores AWG	36
10. Especificaciones motobomba monofásica.....	38
11. Especificaciones de fluido para bomba	41
12. Variación de factor de potencia en función a la carga.....	43
13. Valores medidos en motobomba con instrumento Fluke 435 II	47
14. Dimensiones de barra de rotor.....	49
15. Especificaciones de rotor de motor bomba	56
16. Medidas de base para módulo con motobomba	58
17. Rangos de frecuencias para análisis con equipo Vibrachek	66
18. Variables que se deben obtener mediante el análisis	66
19. Medidas de amplitudes con profundidad progresiva en análisis vibracional	70
20. Medidas de amplitudes análisis espectral corriente en motor con barras rotas.....	73
21. Armónicos de velocidad en bomba con excentricidad permanente	76
22. Armónicos de velocidad en bomba con excentricidad permanente	76
23. Frecuencias calculadas características de excentricidad estática	77
24. Frecuencia armónico de fallo motor con excentricidad estática permanente.....	79
25. Armónicos espectro corriente de motor con excentricidad estática permanente ..	80

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
1. Motor trifásico "jaula de ardilla"	5
2. Principio de funcionamiento de una maquina asincrónica	7
3. Diagrama fasorial de las FEM en el motor de jaula de ardilla	8
4. Núcleo del rotor con averías en barras	11
5. Formas de producirse la excentricidad estática	12
6. Formas de la excentricidad dinámica	12
7. Espectros de magnitudes medidas en vibraciones mecánicas	16
8. Representación de las frecuencias del estator de un motor de inducción	17
9. Fuerza resultante FT	18
10. Espectros característicos en distintos niveles de falla	18
11. Prueba dinámica falla en rotor	20
12. Espectro típico de excentricidad estática	21
13. Armónicos lateral inferior y lateral superior de las corrientes	22
14. Discretización y transformación de un registro vibroacústico.	24
15. Constitución de un acelerómetro	25
16. Motor Eléctrico Trifásico WEG 1/2 HP	28
17. Alternador automotriz (carga)	30
18. Valores de intensidad a diferentes velocidades de giro	31
19. Sistema de transmisión por correa	31
20. Correa de tipo trapezoidal	34
21. Regulador de voltaje	36
22. Motobomba con presencia de excentricidad estática permanente	37
23. Diagrama de bombeo en circuito cerrado	38
24. Arrancador y cable conductor empleado en módulo de excentricidad estática	40
25. Corriente de entrada	45
26. Potencias medidas en la entrada de los motores: barras rotas, excentricidad estática	45
27. Punto de equilibrio potencia vs intensidad en bomba	48
28. Perforación en una de las barras del rotor	50
29. Conexión triangulo	50
30. Puntos de toma de medidas	51
31. Placa base para sistema de simulación de fallas	52
32. Colocación de polea	53
33. Motor montado en la base	54
34. Montaje de alternador a placa base	54
35. Modulo ensamblado de barras rotas	55
36. Diagrama de conexión de cargas eléctricas	55
37. Montaje de sensores en motobomba	57

38.	Base para módulo simulador de excentricidad estática.....	58
39.	Motor bomba para ensayo de excentricidad estática.....	59
40.	Espectro de aceleración maquina sana (sin barras rotas)	67
41.	Espectro de intensidad del estator en maquina sana (sin barras rotas).....	68
42.	Espectro de aceleración 1 barra rota.....	69
43.	Espectro de aceleración 2 barras rotas	69
44.	Espectro de aceleración con 3 barras rotas.....	70
45.	Espectro de corriente con 1 barra rota.....	71
46.	Espectro de corriente con 2 barras rotas.....	72
47.	Espectro de corriente con 3 barras rotas.....	72
48.	Espectro de velocidad en motor excentricidad estática permanente a mínima carga	74
49.	Espectro de velocidad de la vibración en bomba con máxima carga.....	75
50.	Espectro de corriente en motor con excentricidad estática permanente mínima carga	78
51.	Espectro de la corriente del estator en motor con excentricidad estática a máxima carga	79
52.	Curva amplitud vs profundidad para frecuencia característica de barras rotas en análisis de vibraciones	81
53.	Curva amplitud vs profundidad para frecuencia característica de barras rotas en análisis de corriente	82
54.	Curva carga vs frecuencia en análisis de espectro de vibraciones mecánicas en motor con excentricidad	84
55.	Curva carga vs amplitud en análisis de espectro de vibraciones mecánicas	85
56.	Curva carga vs frecuencia en análisis de espectro de corriente	86
57.	Curva carga vs amplitud en análisis de espectro de corriente	87
58.	Curva carga vs amplitud en análisis de espectro de corriente en motor.....	88

LISTA DE ABREVIACIONES

ISO	Organización Internacional de Normalización
NEMA	Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos (USA)
CPM	Ciclos por minuto
RPM	Revoluciones por minuto
FFT	Transformada Rápida de Fourier
DFT	Transformada Discreta de Fourier
RMS	Nivel de vibración global (valor eficaz)
HP	Caballos de Poder
MSNM	Metros Sobre Nivel del Mar
REBT	Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión
MAJA	Motor Asíncrono Jaula de Ardilla
AISI	Instituto americano del hierro y el acero
USB	Universal serial Bus
AWG	Medida de Cable Americano
FEM	Fuerza Electro Motriz
A	Amperios
V	Voltios
W	Vatios

LISTA DE ANEXOS

- A** Especificaciones equipo analizador de vibraciones mecánicas
- B** Armónicos de barras rotas con alojamiento de pernos prisioneros
- C** Guía de operación simulador con barras rotas
- D** Guía de operación simulador bomba con excentricidad estática
- E** Checklist para simulador con barras rotas
- F** Checklist para simulador con excentricidad estática
- G** Guía de laboratorio para práctica I
- H** Guía de laboratorio para práctica II
- I** Guía de laboratorio para práctica III
- J** Guía de laboratorio para práctica IV

RESUMEN

Al analizar la efectividad de modelos mixtos de diagnóstico técnico mediante el monitoreo de variables en dos motores asíncronos de tipo rotor de jaula de ardilla, mediante el análisis espectral de vibraciones mecánicas y análisis espectral de la corriente de alimentación al estator, con el propósito de establecer cuál de las técnicas aporta con mayor información o alcances a fin de garantizar un adecuado criterio de mantenimiento en la identificación de modos de falla. Cada motor posee un modo de falla causado, barras rotas del rotor para un motor trifásico y excentricidad estática para un motor monofásico. Se inició con la construcción de los módulos simuladores de falla siguiendo los criterios de selección de elementos mecánicos constitutivos, obteniendo un sistema de carga por medio de un freno magnético y un sistema de bombeo cerrado respectivamente, para luego montar y ensamblar cada subsistema para llegar a la etapa de operación y pruebas. En el análisis se estudió el espectro de aceleración y velocidad de vibraciones y espectro de la corriente, con el equipo analizador Vibracheck 200 y la pinza amperimétrica Fluke i5s conectada al mismo equipo, se identificó en los dos modelos de diagnóstico las frecuencias características de falla calculadas mediante ecuaciones particulares para cada fallo. Las curvas de tenencia en los dos ensayos muestran un crecimiento gradual en función al incremento de falla y carga, con cambios más claros en el análisis de vibraciones mecánicas. Éstas aportan con valores de frecuencia y amplitud más claros en ambos modos de falla, siendo más efectivo que el análisis de corriente que presenta frecuencias características pero limitada lectura de amplitudes. Las operaciones se llevaron de forma esperada obteniendo los resultados funcionales de los simuladores. En futuros ensayos se deben cumplir las especificaciones presentadas en los anexos.

PALABRAS CLAVE: <DIAGNOSTICO TÉCNICO> <ANÁLISIS ESPECTRAL DE VIBRACIONES> <ANÁLISIS ESPECTRAL DE CORRIENTE> <MODO DE FALLO> <EXCENTRICIDAD ESTÁTICA> <BARRAS ROTAS> <ESPECTRO DE VIBRACIONES MECÁNICAS> <ESPECTRO DE CORRIENTE>

ABSTRACT

Mixed models of technical diagnosis were analyzed by the monitoring of variables in two synchronous engines with a squirrel cage rotor, through spectrum of mechanical vibration analysis and spectral voltage to the stator, in order to establish which of the techniques brings more information to ensure an adequate criterion of maintenance in the identification of failure modes. Each engine has a caused failure mode, broken bars in the rotor with three-phase and static eccentricity for a single phase engine. It began with the design of units simulators with failure following the criteria of mechanical constituent elements, obtaining a load system by means of a magnetic brake and a pumping closed system respectively, for then assemble and install each subsystem to operate and test. In the analysis it was studied the spectrum of acceleration, speed of vibrations and spectrum power, with Vibrachek 200 device analyzer and the Fluke i5s clamp ammeter connected to the same computer, as well as frequencies characteristics of defects calculated were identified in two diagnosis using individuals calculations for each failure. The trend curves in the two trials show a gradual growth in its increase of failure and load, with more changes in the analysis of mechanical vibration. These bring with values of frequency and range in both failure modes, being more effective than the analysis electricity which shows frequencies features but limited reading of ranges. The operations were carried with the functional results of simulators. So, in future trials it must meet the specifications presented in the additions.

KEY WORDS: <TECHNICAL DIAGNOSIS> <SPECTRAL ANALYSIS OF VIBRATIONS> <SPECTRAL ANALYSIS OF POWER> <FAILURE MODE> <ECCENTRICITY STATIC> <BROKEN BARS> <SPECTRUM OF MECHANICAL VIBRATION> <SPECTRUM OF ELECTRICITY>

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

El avance, exigencias y competitividad de las empresas han hecho que el uso del motor eléctrico sea imprescindible dentro de su desarrollo y producción. Siendo el motor eléctrico la parte fundamental de las maquinas es necesario que exista un diagnóstico confiable y efectivo a la hora de identificar modos de falla en los mismos, un alta disponibilidad de los equipos representan el progreso, elevando la producción y evitando los tiempos de paradas no programadas, al implementar los correctivos adecuados anticipando las fallas catastróficas se llega al aseguramiento de la calidad de operación, trabajo y resultados esperados dentro de los procesos u objetivos empresariales.

Con el desarrollo tan acelerado de la tecnología en la actualidad el “mantenimiento basado en la condición” (*ISO 13372,2012*), juega un papel muy importante a la hora de emitir diagnósticos de estados actuales de los motores de inducción magnética, por medios de equipos y software modernos que presentan una alta efectividad a la hora de realizar los mencionados procedimientos. En el laboratorio de mantenimiento predictivo de la ESPOCH, se llevara a cabo un análisis de la efectividad de dos modelos de diagnóstico técnico sometiendo a pruebas los módulos simuladores de fallas a fin de garantizar y ampliar el conocimiento de las técnicas que se van a ejecutar, alcanzando los objetivos trazados en el presente trabajo de titulación.

1.1 Antecedentes

Para garantizar un correcto aprovechamiento de los recursos mediante una aceptable producción las empresas buscan en todo momento mantener los equipos con la más alta disponibilidad posible, para alcanzar esta meta es necesario la elaboración e implementación de un correcto modelo de mantenimiento basado en la condición (*ISO 13372,2012*), sin embargo desde hace mucho tiempo se han venido empleando técnicas obsoletas con equipos de baja capacidad de análisis de diagnóstico técnico, los cuales no arrojaban los resultados esperados y no se lograba llegar al modo de falla, obteniendo únicamente resultados muy generales, que no permiten establecer un resultado o recomendación de aplicación de alguna tarea de mantenimiento, y en el peor

de los casos se recurría a la reposición del activo significando costos elevados de mantenimiento y pérdidas significativas de producción por paradas.

Tradicionalmente para la detección de fallas en motores de inducción las herramientas empleadas por el personal de mantenimiento son un megger (medidor de aislamiento) y un ohmímetro (Juan C. Hidalgo B., MBA –Termogram), actualmente gracias al desarrollo tecnológico en el campo del mantenimiento basado en la condición, contamos con equipos tales como el analizador de vibraciones mecánicas, analizador de la calidad energética y la pinza amperométrica, que conjuntamente con el software de análisis de datos nos entregan información detallada y particular de los modos de falla identificados, llegando a un diagnóstico eficaz mediante el cual se establece las tareas de mantenimiento más adecuadas y económicamente factibles.

1.2 Justificación

Dentro del desempeño de los motores eléctricos existen un sinnúmero de anomalías que se pueden presentar en forma de fallas potenciales, tales efectos pueden causar paradas inesperadas y consecuentemente pérdidas significativas en la producción. El diagnóstico técnico es una herramienta del mantenimiento basado en la condición muy utilizado en la actualidad, mediante estas técnicas se pueden obtener mediciones de efectos físicos como incremento de temperatura, vibración, ruido, etc. que sirven para llegar a determinar la ocurrencia de algún modos de falla.

Las técnicas de diagnóstico que se han desarrollado se concentran en la medición y análisis de uno solo de los efectos físicos que pueden manifestar los modos de falla, por ejemplo, la termografía analiza los incrementos de temperatura, el análisis vibracional analiza la intensidad y el modo de la vibración, etc.

Por lo general es habitual que se escoja una sola técnica para la detección de fallas, sin que se llegue a cruzar la información de las mediciones entre otras técnicas, por lo que se pierde efectividad y antelación en el diagnóstico. El beneficio de utilizar modelos mixtos de diagnóstico es en primer lugar detectar a tiempo las fallas potenciales y en segundo lugar ser asertivos en el diagnóstico. Así se llega establecer una conclusión satisfactoria y mayormente eficaz a la hora de realizar el mantenimiento basado en la condición, con

sus respectivas conclusiones y resultados, haciendo cada vez más efectivo el diagnóstico técnico.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general.

Analizar la efectividad de los modelos mixtos de diagnóstico técnico en motores eléctricos trifásicos asincrónicos jaula de ardilla.

1.3.2 Objetivos específicos:

Analizar la dinámica de los modos de falla de los motores trifásicos asincrónicos jaula de ardilla.

Readecuar módulos experimentales que se van a utilizar para la simulación de los modos de falla.

Elaborar el manual de mantenimiento, operación y seguridad del módulo de simulación.

Determinar las configuraciones y calibraciones de los equipos y software de análisis y diagnóstico técnico.

Establecer los procedimientos para toma de mediciones en módulos experimentales.

Medir y analizar las variables físicas producidas por los modos de falla inducidos.

CAPÍTULO II

2. MARCO REFERENCIAL

La conciencia de mantener en todo momento equipos que trabajen con la mayor disponibilidad posible está muy marcada en la industria, la necesidad de mantener un proceso permanente sin detenciones por tareas correctivas, hace que el empleo de técnicas de mantenimiento basado en la condición, sean imprescindibles dentro de los planes de mantenimiento integral, generando conocimiento y procesos adecuados a fin de garantizar el desempeño laboral de los equipos, la identificación de modos de falla son los pilares para el desarrollo de dichas técnicas, en los motores de inducción trifásica se presentan modos de falla muy particulares distintos unos de otros, dando paso a características específicas que se va a inducir previamente para el correcto entendimiento del presente proyecto, el motor de inducción trifásica constituye una máquina de alta fiabilidad lo cual lo ha lanzado a una introducción masiva al mercado y la industria, pese a esta fortaleza que presenta no se puede negar el hecho de la presencia de averías que se reflejan principalmente por desgaste natural, cargas y sobre esfuerzos a los que, en medida adecuada o desmedida están sometidos los motores.

En este capítulo se van a explicar cuáles son las complicaciones o averías que presentan estas máquinas de manera clara mediante el análisis de los fenómenos y espectros que se obtienen a través del análisis predictivo, además de los esfuerzos a los que están sometidos los motores y los principales daños que estos pueden generar sobre las partes fundamentales de un motor de inducción.

El presente capítulo no busca hacer un listado de cada modo de falla o esfuerzo de modo exhaustivo, para casos particulares existe documentación certificada además de revistas de renombre, la intención principal es generar un documento bibliográfico de forma fundamental el cual presentara los conocimientos bibliográficos necesarios que afianzara el desarrollo del proyecto, y nos ayudara a entender los indicios de las fallas para así poder tomar mejor decisión sobre los métodos de diagnóstico técnico, siempre y cuando el modo de falla permita su monitorización.

Pese a los múltiples daños que se puedan presentar una máquina de estas características,

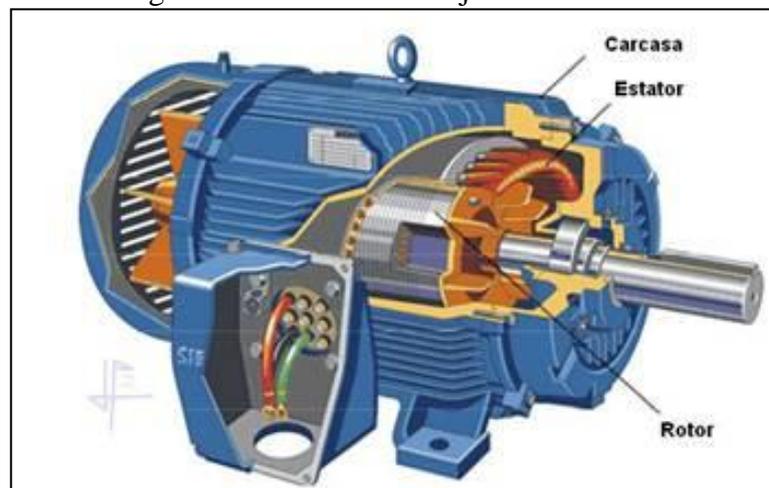
se va a tener una dirección enfocada a los daños mecánicos en el eje y la excentricidad estática, sin dejar de mencionar que existen daños en rodamientos que se pueden ampliar en investigaciones profundas y de gran impacto técnico. Finalmente cabe mencionar que este capítulo está destinado a la presentación bibliográfica de la causa y evolución de averías potenciales de motores de inducción trifásica de rotor de jaula de ardilla, y cuyas curvas características de tensión e intensidad sean sinusoidales, tomando lo mencionado como condiciones fundamentales con las que se va a trabajar.

2.1 Motor de inducción trifásica de jaula de ardilla asincrónico

Generalmente se utilizan tres diferentes procesos de pasteurizado, aunque el procedimiento es el mismo lo que los diferencia son los parámetros de tiempos y temperatura. Estos métodos son:

El motor de inducción o motor asíncrono es el motor eléctrico más ampliamente utilizado en la industria, abarcando aproximadamente un 85% del total de las cargas eléctricas. Consta de una parte fija, denominada estator, y una parte giratoria, denominada rotor, incorporando cada una de ellas una serie de devanados formados por un conductor eléctrico, y separadas por una capa de aire denominada entrehierro. A diferencia de la máquina de corriente continua y de la máquina síncrona, en este caso ambos devanados son alimentados por corriente alterna sinusoidal. Esta corriente alterna es suministrada al estator directamente de la red de alimentación, mientras que al devanado del rotor se le suministra por el fenómeno de inducción electromagnética.

Figura 1. Motor trifásico "jaula de ardilla"



Fuente. López, 1998

2.1.1 *Clasificación de los motores comerciales de inducción por sus propiedades eléctricas y mecánicas.* El desarrollo del rotor de doble jaula de ardilla creó tal variedad y adaptabilidad en el diseño de rotores para motores de inducción que ha llevado a diversas características de curva deslizamiento-par. Al dar la proporción correcta al devanado de doble jaula de ardilla, los fabricantes han desarrollado numerosas variaciones del diseño del rotor de vaciado o normal único. Esas variaciones tienen como consecuencia pares de arranque mayores o menores que el del diseño normal y también menores corrientes de arranque.

Tabla 1. Características de los motores comerciales de inducción jaula de ardilla

Clasificación en letras NEMA				
Clase NEMA	Par de arranque (Núm. de veces el nominal)	Corriente de arranque (Núm. de veces el nominal)	Regulación de velocidad (por ciento)	Nombre de clase del motor
A	1,5-1,75	5-7	2-4	Normal
B	1,4-1,6	4,5-5	3-5	De propósito general
C	2-2,25	3,5-5	4-5	De doble jaula, alto par
D	2,5-3,0	3-8	5-8, 8-13	De alto par, alta resistencia
F	1,25	2-4	Mayor de 5	De doble jaula, bajo par y baja corriente de arranque

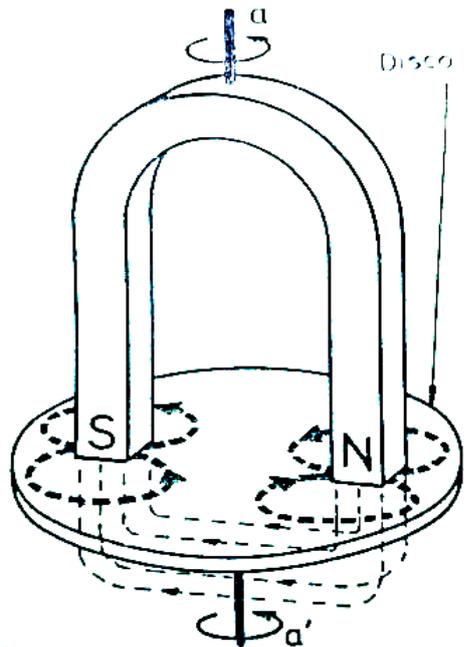
Fuente. Kosow, 1993

Los valores solicitados son para voltaje nominal en el arranque. Para distinguir entre los diversos tipos disponibles, la National Electrical Manufacturers Association (NEMA MG, 1998) ha desarrollado un sistema de identificación con letras en el cual cada tipo de motor comercial de inducción de jaula de ardilla se fabrica de acuerdo con determinada norma de diseño y se coloca en determinada clase, identificada con una letra. Las propiedades de la construcción eléctrica y mecánica del rotor, en las cinco clases (NEMA MG, 1998) de motores de inducción de jaula de ardilla, se resumen en la tabla. (KOSOW, 1993)

2.1.2 *Principios de funcionamiento.* El dispositivo de la figura está constituido por un imán, solidario con un eje central a, que puede girar libremente, y un disco metálico de cobre, hierro o aluminio solidario de otro eje a' y que, como el anterior puede también girar. Si imprimimos al imán un movimiento de rotación, por ejemplo en el sentido

indicado por la flecha, se observa un curioso fenómeno: el disco metálico inicia un movimiento circular cuyo sentido es el mismo del imán, que se mantendrá hasta que cese la rotación del mismo. Al cortar el disco las líneas magnéticas del imán en movimiento, se inducen corrientes parásitas, que a su vez se encuentran inmersas en un campo magnético en movimiento (el del imán). En virtud de la ley de Lenz (todo fenómeno eléctrico se opone a la causa que lo produce) la dirección de la fuerza que aparece entre las corrientes parásitas del disco y el campo magnético que las origina es tal que el disco tiende a seguir al imán en su movimiento de rotación, para que no exista movimiento entre ambos y, por tanto, no se induzcan las mencionadas corrientes (Ley de Lenz). Del fenómeno en cuestión se deduce que a partir del movimiento del imán se produce una generación de corrientes y una acción motriz que obliga a estas corrientes a seguir la dirección del campo inductor.

Figura 2. Principio de funcionamiento de una máquina asincrónica



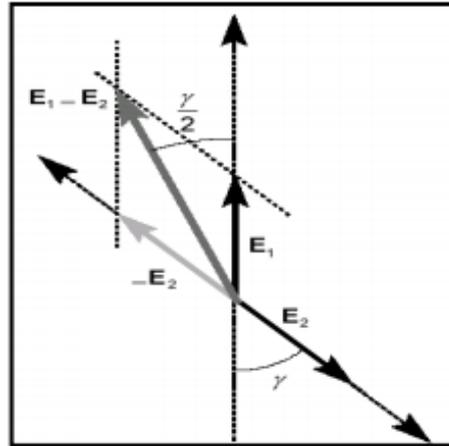
Fuente. Ramírez, 1973

En realidad el dispositivo es un motor elemental, en el que el imán es el inductor, y el disco el inducido, de los de corriente continua, las corrientes se originan en el inducido, en lugar de llevarse a él, mediante escobillas, desde la línea de alimentación exterior. (RAMÍREZ, 1973).

2.1.2.1 *Campo giratorio.* El campo magnético rotatorio se produce cuando el motor de inducción se excita con una corriente alterna del estator, se conserva constante en el

tiempo, pero varía en el espacio como se muestra en la figura 3, la frecuencia de las corrientes inyectadas en el estator le da la velocidad de giro al campo magnético rotatorio.

Figura 3. Diagrama fasorial de las FEM en el motor de jaula de ardilla



Fuente. Ramírez, 1973

La inducción magnética al estator del motor se desplaza de forma circular. Esa velocidad de giro nos da la velocidad de sincronismo del motor n_s , que es función de la frecuencia de la red eléctrica f_1 que alimenta el motor.

La velocidad de giro sincrónica se designará como n_s , es decir la del campo creado por las corrientes trifásicas del estator. Siendo su valor en rpm:

$$n_s = \frac{60 \cdot f_1}{p} \quad (1)$$

Dónde:

f_1 : Frecuencia de alimentación del estator (50 o 60 Hz generalmente).

p : Número de pares de polos

Si el motor gira, en virtud de la carga, a una cierta velocidad n_m , la diferencia de velocidades entre el campo y el rotor ($n_s - n_m$) es la velocidad relativa de giro con que las líneas del campo cortan a los conductores del rotor y bajo esta diferencia de velocidades se induce en el rotor una fuerza electromotriz que originara, a su vez, una corriente de frecuencia f_r . Ésta corriente es la que se induce directamente en rotor y que genera una fuerza sobre las barras del rotor.

$$f_r = \frac{p(n_s - n_m)}{60} \quad (2)$$

Expresando n_s y n_m en revoluciones por minuto.

El campo magnético giratorio induce en el rotor fuerzas electromotrices, y debido a que las barras que constituyen la jaula de ardilla forman un circuito cerrado, se generan corrientes eléctricas que obligan al rotor a moverse en el sentido de giro del campo magnético del estator. (DUQUE, 2005).

2.1.2.2 *Entrehierro.* El entrehierro es el espacio que existe entre el estator y el rotor de jaula de ardilla, en los motores asíncronos conviene que la reluctancia del entrehierro sea la mínima, la anchura del entrehierro en los motores asíncronos es mucho menor que la de generadores y máquinas de corriente continua en general, debido a que en estas últimas, si el entrehierro fuera excesivo crecería demasiado la reacción del inducido, y el campo inductor sería excesivamente débil. (DUQUE, 2005)

2.1.2.3 *Deslizamiento y su medida.* La velocidad de giro del rotor es algo menor a la velocidad de sincronismo (valores menores de un 5 % por lo general), dando lugar al concepto de deslizamiento. El deslizamiento es el movimiento relativo, donde n_s es la velocidad síncrona del campo magnético rotatorio y n_m es la velocidad actual del rotor, entonces la diferencia entre las dos se define como deslizamiento, éste se le expresa como una fracción de la velocidad síncrona, mediante la ecuación. (DUQUE, 2005)

$$s = \frac{n_s - n_m}{n_s} \quad (3)$$

Dónde:

s : Deslizamiento (%).

n_s : Velocidad sincrónica

n_m : Velocidad del rotor

Cuando el rotor sufre un deslizamiento es afectado por la inercia y las pérdidas que debe vencer, lo cual produce que la velocidad del rotor disminuya en relación a la velocidad

síncrona del campo magnético rotatorio.

La velocidad del rotor no llegará a ser mayor a la velocidad síncrona, y si sucede en alguna ocasión se dirá que el rotor posee un deslizamiento negativo, por lo tanto la máquina está operando como un generador.

2.2 Fallos en motores eléctricos

Por lo general los fallos que se dan en los motores de inducción trifásica no son de fácil detección al tratarse, de una máquina que fundamenta su funcionamiento establecido en condiciones operativas con carga, además las variables de funcionamiento no son detectables a los sentidos, si no con la ayuda de instrumentación adecuada, además de la difícil medida y monitoreo de corrientes de baja frecuencia, la exposición a grandes temperaturas también pueden originar múltiples fallas en los devanados del motor pese a la robustez que estos presentan.

Se pueden presentar una diversidad de fallas en el motor debido también a las grandes cargas que este soporta y a la fuerza centrífuga que se genera, especialmente en el arranque del motor y el cambio de regímenes de funcionamiento, siendo muy común el empleo de variadores de frecuencia con los que se regulan las velocidades de giro de las máquinas.

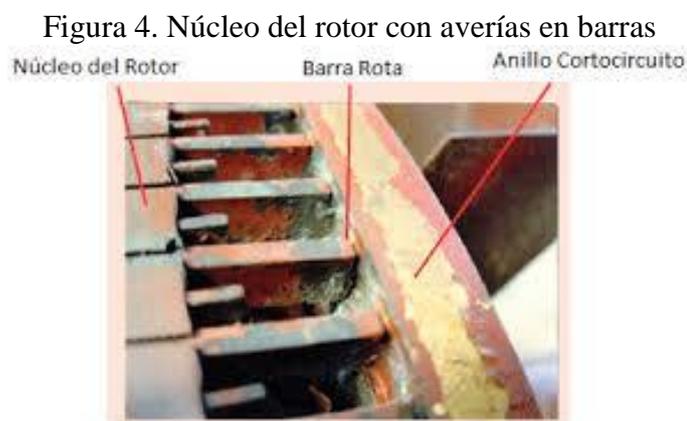
2.2.1 Fallas en el rotor por barras rotas. Los problemas que se suelen dar en el rotor de jaula de ardilla de los motores de inducción no son sencillos de detectar, debido a que no disponemos de conexión eléctrica con el mismo y la dificultad de medir las corrientes de baja frecuencia que en él se inducen, por lo cual un diagnóstico preciso es difícil de obtener con métodos tradicionales.

Aunque la jaula del rotor es muy rígida sus problemas se ven relacionados con las fuertes temperaturas que soporta el rotor y la fuerza centrífuga que se produce al final de las barras, o la salida de esta del paquete rotatorio, en su conexión con el anillo de cortocircuito, particularmente durante los arranques y cambios de régimen de funcionamiento del motor. El origen de los defectos puede darse por un mal diseño de la jaula durante su construcción, mala elección de los elementos materiales, deficiente

manufactura de la jaula, durante los procesos de fundición de la matriz de los rotores o por malas uniones entre las barras de la jaula y el anillo de cortocircuito.

Si la velocidad del rotor fluctúa debido a variaciones de la carga o ciclo de trabajo, particularmente en motores que experimentan varios arranques, variación de frecuencia, inversión de giro, etc., este tipo de fallos produce alteraciones de la distribución de flujo magnético en el entrehierro que vienen reflejados, en pulsaciones de velocidad, mayor vibración, alteraciones en la corriente de alimentación y en el flujo axial de dispersión.

2.2.1.1 *Defectos en el núcleo del rotor.* Los grandes esfuerzos mecánicos que tienen lugar en los rotores pueden ser causa de problemas en el paquete magnético además en sus barras o bobinas. La propagación del agrietamiento desde la superficie del rotor, debido a importantes ciclos de carga, bajo la acción de su propio peso durante la rotación, puede originar fallos catastróficos en el mismo. Esta acción es amplificada si la ventilación contiene humedad u otras impurezas que faciliten la corrosión y que contribuyen a disminuir la resistencia del material.



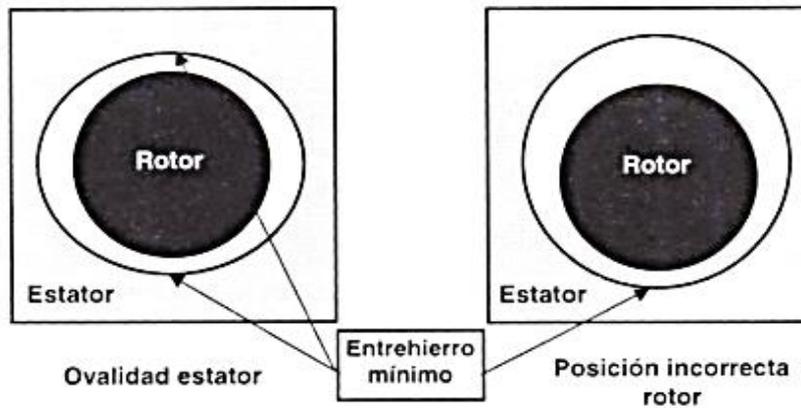
Fuente. White, 2010

2.2.2 *Excentricidad.* La presencia de asimetrías entre el rotor y estator, es decir en el entrehierro, se traduce como la excentricidad, constituye un problema significativo en los motores de jaula de ardilla, debido a la longitud relativamente pequeña del entrehierro.

2.2.2.1 *Excentricidad estática.* La excentricidad estática consiste en una distorsión en el tamaño del entrehierro en la cual el valor mínimo de este se encuentra en una posición fija del espacio. Esta distorsión puede ser causada por la ovalidad del alojamiento estatórico, o por un incorrecto posicionamiento del rotor dentro del primero, causado por

un mal apoyo de los cojinetes o rodamientos, desgaste de estos, malformación de los alojamientos, excesiva tolerancia, etc. En la figura se muestran las dos formas posibles de aparición de la excentricidad estática. (FERNÁNDEZ, 1998)

Figura 5. Formas de producirse la excentricidad estática

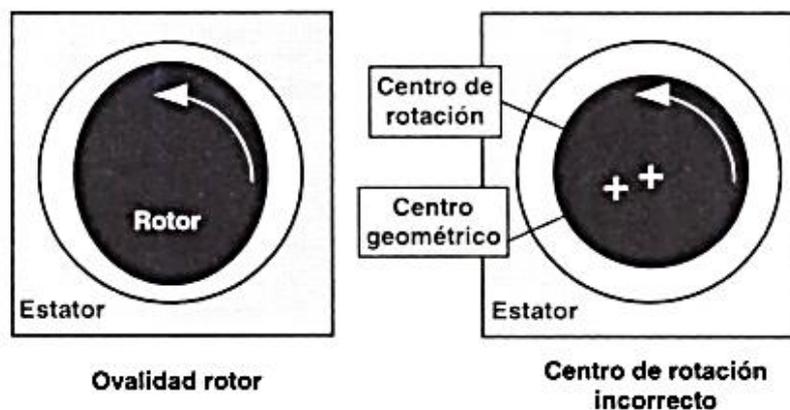


Fuente. Fernández, 1998

2.2.2.2 *Excentricidad dinámica.* En el caso de la excentricidad dinámica lo que ocurre es que el punto de entrehierro mínimo no permanece fijo en una posición del espacio sino que gira solidario con el rotor. La causa de este comportamiento puede ser la ovalidad del rotor, o el hecho de que el centro de giro de este último no sea su centro geométrico de rotación.

Los procesos que originan la excentricidad dinámica son similares a los que causan la excentricidad estática: desgaste de los cojinetes, flexión del eje, malformaciones en el paquete magnético rotórico, etc. En la figura se presenta de forma esquemática un motor con excentricidad dinámica. (FERNÁNDEZ, 1998)

Figura 6. Formas de la excentricidad dinámica



Fuente. Fernández, 1998

La excentricidad rotórica responde a distintas causas de diseño, fabricación, montaje del motor y del propio funcionamiento, siendo las principales:

- Tolerancias dimensionales de los distintos componentes.
- Posicionamiento incorrecto del rotor respecto al estator.
- Deformación del eje.
- Averías en los rodamientos, tales como: montaje defectuoso, holguras, desgaste excesivo, etc.
- Desalineamiento, desequilibrio dinámico del rotor.
- Resonancia mecánica a velocidad crítica.
- Desequilibrio de las fuerzas radiales en el entrehierro (campo magnético desequilibrado).
- Deformación del rotor consecuencia de sobrecalentamiento o de la existencia de gradientes térmicos.

La presencia de excentricidad en el rotor se caracteriza por la existencia de variaciones en la longitud del entrehierro y, como consecuencia, por la permanencia que el entrehierro presenta. El resultado es una distribución asimétrica del flujo magnético, que origina a su vez un conjunto de efectos adversos, entre los cuales pueden destacarse. (DUQUE, 2005)

- Desequilibrio del campo magnético en el entrehierro, éste fenómeno, según podemos ver, es causa y efecto de la existencia de excentricidad.
- Circulación de corriente eléctrica a través de los rodamientos.
- Vibraciones.
- Ruido.

2.3 Mantenimiento predictivo para motores de jaula de ardilla

Para salvar las deficiencias de las estrategias de mantenimiento anteriormente utilizadas y manejadas y en respuesta a las necesidades actuales sobre la seguridad de funcionamiento de los equipos y reducción de costes de mantenimiento, aparece una técnica de monitoreo continuo del estado de las máquinas, especialmente de aquellas que son críticas en cada explotación.

Los motores de inducción trifásica con rotor de jaula de ardilla, por su gran aceptación en la industria, se ven expuestos a ambientes hostiles, aplicaciones incorrectas y defectos de fabricación. El que se produzcan defectos internos, tales como cortocircuitos, derivaciones a masa, barras rotas o fallos de rodamientos es, hasta cierto punto inevitable.

Lo mismo ocurre respecto a los defectos provocados por agentes o efectos externos, como por ejemplo: faltas de fase, asimetrías de alimentación, bloqueos del rotor etc. Se han desarrollado decenas de métodos de diagnóstico para motores de inducción, atendiendo cada uno de ellos a un grupo particular de fallas, estos métodos están generalmente basados en el análisis de magnitudes disponibles en terminales del motor, o aquellas variables que las podemos observar con la ayuda de instrumentos adecuados (sensores). (DUQUE, 2005)

2.3.1 *Diagnósticos técnicos empleados para la detección de modos de falla.* Las variables a ensayar o comprobar en el funcionamiento de las maquinas eléctricas rotativas serán muy diferentes, dependiendo del tipo de que se trate y donde se encuentre.

Eso sí aunque haya diferencias entre variables tomadas, todas tienen que tener una característica en común y es que se puedan medir mientras la maquina está en funcionamiento, para no parar la producción.

En el mantenimiento de un motor de inducción, se van a tener en cuenta estos dos diagnósticos:

- Diagnóstico por análisis de las vibraciones.
- Diagnóstico por análisis espectral de las corrientes del estator.

2.3.1.1 *Diagnóstico por análisis de vibraciones mecánicas.* En condiciones óptimas de funcionamiento las maquinas eléctricas rotativas no deberían sufrir ningún tipo de vibración, aunque las imperfecciones constructivas y las condiciones de funcionamiento pueden provocar alguna vibración.

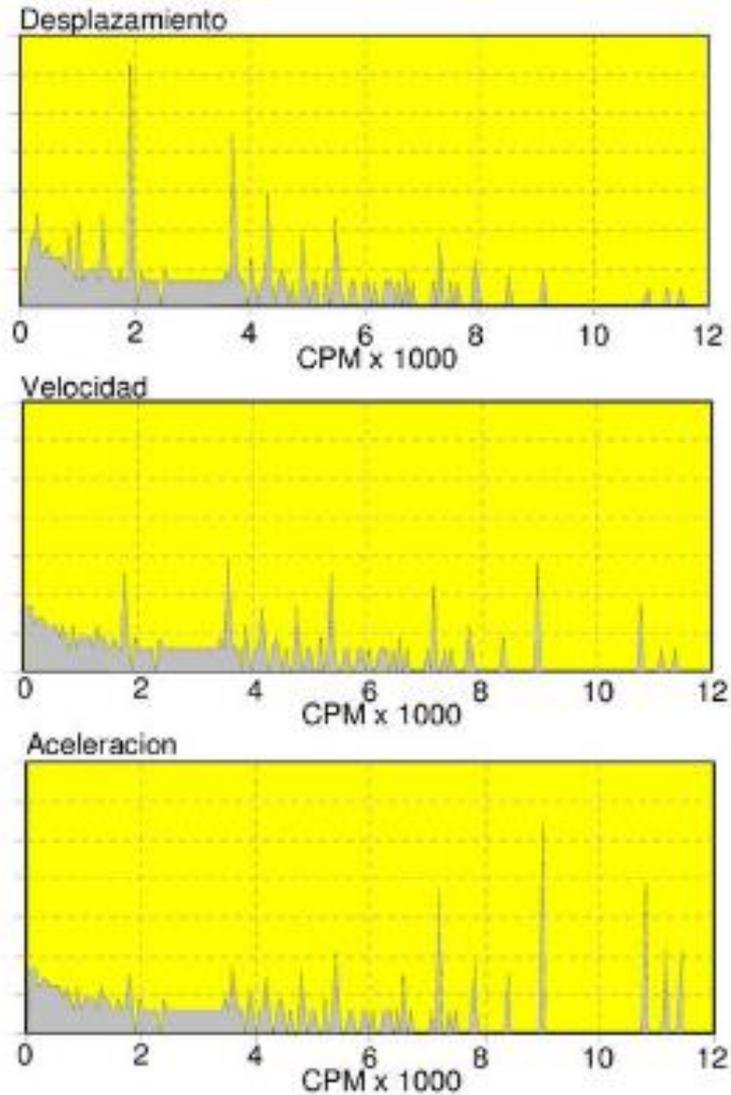
Aunque dichas vibraciones propias de la maquina no sean causadas por averías, si hay que tener en cuenta aquellas vibraciones que tengan distintas frecuencias de vibración, porque ellas pueden estar descubriendo una avería.

- **Vibraciones mecánicas en motores jaula de ardilla.** Según la norma ISO 2041: 2009, “Vibración y Choques - Vocabulario”, define a la vibración como: “Oscilación mecánica sobre un punto de equilibrio. Las oscilaciones pueden ser periódicas o aleatorias” (ISO 2041, 2009). Es decir es el movimiento oscilatorio de un cuerpo entorno a su punto de equilibrio, el cual es producido por una fuerza de excitación. Cuando la fuerza que actúa sobre el cuerpo es cero éste volverá a su punto de equilibrio.
- **Magnitudes de las vibraciones.** La velocidad se define como la proporción de cambio en el desplazamiento, su unidad en sistema internacional es mm/s y en el sistema ingles in/s. la velocidad tiene un avance sobre el desplazamiento en un ángulo de 90° de fase y determina la severidad de la vibración. (WHITE, 2010)

Los análisis de la magnitud de la velocidad medida, son el mayor campo de aplicación al ser directamente proporcional al esfuerzo y al desgaste de un sistema mecánico. La medida de la velocidad permite reconocer la mayoría de los patrones de fallas primarias y de otros componentes cuando están en estado evidente. (GARCIA, 2014)

- **Aceleración.** Se define como la proporción de cambio en la velocidad se mide en gravedades (g) y equivale a $9,8 \text{ mm/s}^2$ en el sistema internacional y en el sistema ingles $386,08 \text{ in/s}^2$. La aceleración tiene un avance sobre la velocidad en un ángulo de 90° de fase y determina la magnitud de la fuerza de vibración. El espectro de aceleración se lo utiliza para visualizar lecturas correspondientes al dominio de frecuencial a valores superiores a 500Hz, el rango de medida óptimo de la aceleración comprende a frecuencias medias altas. (WHITE, 2010).

Figura 7. Espectros de magnitudes medidas en vibraciones mecánicas



Fuente. White, 2010

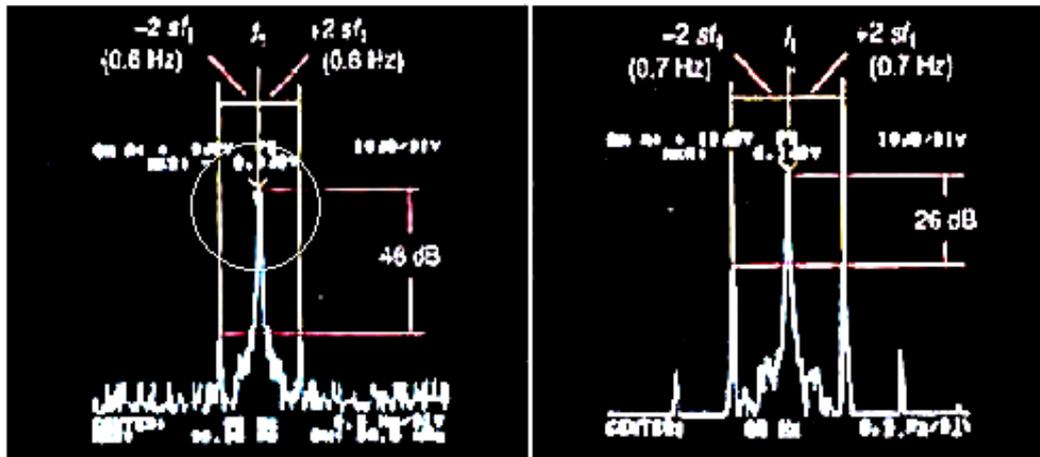
2.3.1.2 *Diagnóstico por análisis espectral de las corrientes del estator.* Con este diagnóstico, se puede llegar a detectar averías tanto eléctricas como mecánicas de las máquinas. Su aplicación fundamental en los motores de inducción se centra en descubrir la rotura de barras del rotor en jaula de ardilla.

Si se diera el caso de barras rotas en el rotor, el motor no para inminentemente, pero se genera una degradación del funcionamiento del mismo y es posible que se produzcan efectos secundarios, como daños mecánicos en el aislamiento y los devanados.

Para averiguar si hay barras defectuosas en el rotor, se analizan las frecuencias del estator con unas herramientas informáticas complejas. Si dichas frecuencias se salen de las correspondientes al correcto funcionamiento del motor, puede que esto haya sido causado

por la rotura de una barra y, por tanto, tendría que planificarse su pronta sustitución. (GONZÁLEZ, 2012).

Figura 8. Representación de las frecuencias del estator de un motor de inducción con funcionamiento óptimo (izquierda) y otro averiado (derecha).



Fuente. González, 2012

Tal y como se observa en las dos graficas proporcionadas por la herramienta informática, se aprecia que en la maquina sana tan solo aparece un pico de frecuencia (indicados en el dibujo por círculos amarillos). Si la maquina estuviera bien, en la imagen de la derecha tan solo aparecería un pico de frecuencia, pero aparecerán el central y dos a los lados. Estos picos están indicando que la frecuencia del estator es diferente y que algo no va bien, por ejemplo se ha podido romper una barra del rotor en jaula de ardilla. (GONZÁLEZ, 2012).

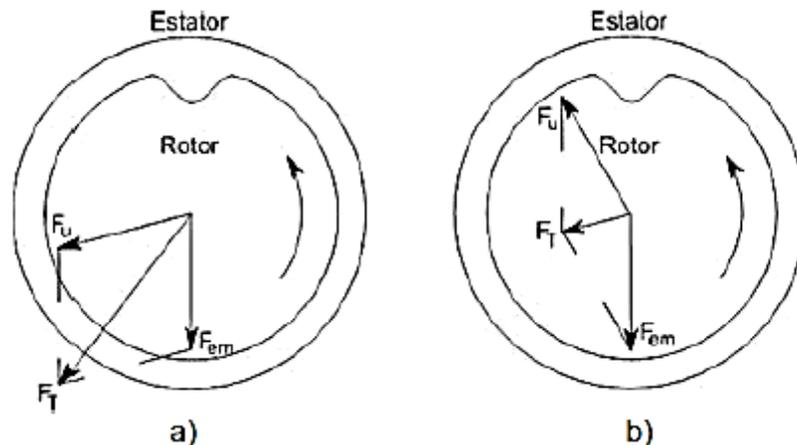
2.3.2 Diagnóstico técnico en motor con barras rotas.

2.3.2.1 *Análisis de vibraciones mecánicas generadas por barras rotas.* El análisis de vibraciones consiste en medir las vibraciones de la maquina mediante un acelerómetro y luego procesar la señal mediante distintas técnicas para evaluar si la maquina presenta algún tipo de falla.

Debido a la disminución de la corriente que circula por una barra dañada, el efecto provocado sobre el motor es muy similar al que ocurra si el entrehierro en ese punto fuese mayor, como indica la figura 9, debido a que la fuerza radial en la cual se produce, ésta diferencia en la fuerza radial gira con el rotor a la velocidad de giro, por lo que se genera una fuerza desbalanceada rotatoria $1 \times \text{RPM}$ y en consecuencia, vibraciones periódicas a

la velocidad de rotación del motor. Esta fuerza actuara sobre el rotor de la misma manera en que lo hace el desbalanceo, una fuerza de valor constante que gira con el rotor. (Diagnóstico de la Condición de las Barras de Motores de Inducción, 2013)

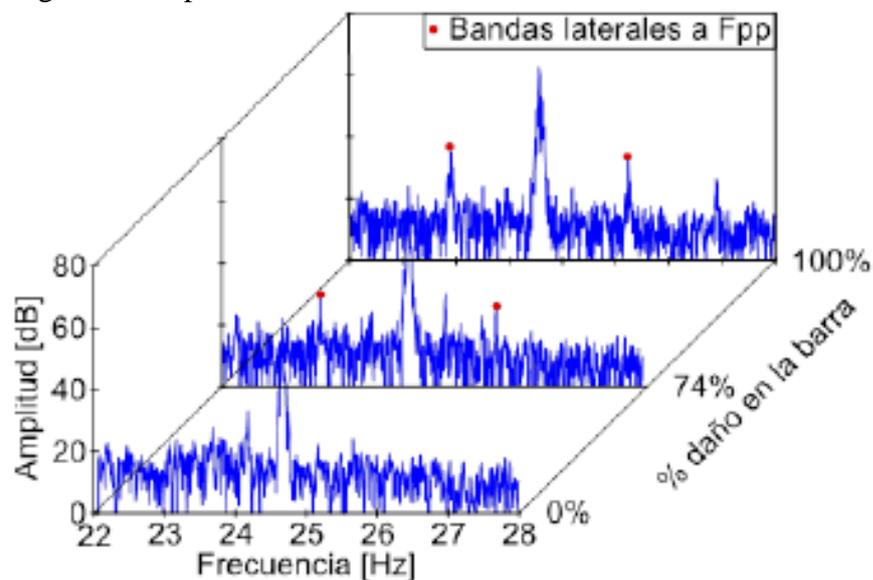
Figura 9. Fuerza resultante F_T debido a la interacción entre la fuerza electromagnética desbalanceada F_{em} y la fuerza F_u generada por el desbalanceamiento.



Fuente. Talbot, 2013

- **Espectros resultantes.** La figura 10, muestra tres espectros obtenidos en el ensayo para una carga constante y distintos niveles de daño. Se observa que las bandas laterales alrededor de la $1 \times \text{RPM}$, síntoma característica de este defecto, se presentan cuando el daño en la barra ya está en un estado más avanzado, alrededor de un 74%. (Diagnóstico de la Condición de las Barras de Motores de Inducción, 2013)

Figura 10. Espectros característicos en distintos niveles de falla



Fuente. Talbot, 2013

- **Frecuencia característica para espectro de vibraciones con barras rotas.** El espectro de vibración de la máquina de inducción puede utilizarse para la detección de roturas o agrietamientos en la jaula del rotor, a partir de la presencia en el mismo de determinadas componentes de frecuencia característica. (DUQUE, 2005)

En el espectro de vibración del motor la presencia de anomalías en las barras rotas puede presentarse con el siguiente síntoma. Mayor amplitud en las frecuencias de paso de barras del rotor (f_{pb}) con bandas laterales espaciadas dos veces la frecuencia de línea.

$$f_{br} = f_{pb} \pm 2f_1 \quad (4)$$

Siendo:

$$f_{pb} = Rf_r \quad (5)$$

Donde.

f_{br} : Frecuencia característica de falla por barras rotas (vibraciones mecánicas)

f_1 : Frecuencia de la red (60 Hz)

f_{pb} : Frecuencia de paso de barras del rotor

R : Número de barras del rotor

f_r : Frecuencia de giro del rotor

2.3.2.2 *Análisis de la corriente del estator en barras rotas.* Cuando nos referimos a la condición de un rotor se deben de revisar; las barras, laminaciones y los anillos de cortocircuito. (Análisis de las zonas de falla de Motores Eléctricos, 2008).

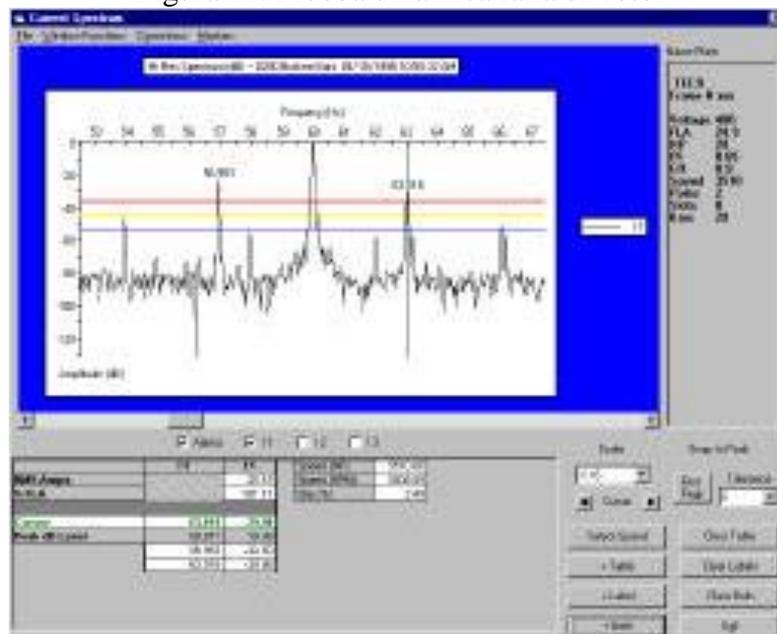
El efecto de la asimetría del rotor (barras rotas o dañadas), queda manifestado por la aparición de dos series de armónicos espaciales en el entrehierro, que giran en sentido contrario y que inducen nuevas fuerzas electromotrices en el estator que, a su vez, darán lugar a la aparición de nuevas componentes de frecuencia en la corriente del estator. (DUQUE, 2005).

Dinámicamente se identifica las barras rotas en un análisis de corriente del motor, este se desarrolla al tomar la señal corriente de las tres fases del motor y se pasa al dominio de la frecuencia (FFT).

El análisis dinámico identifica una falla en el rotor como una banda lateral, a la frecuencia de línea a una frecuencia llamada frecuencia de paso de polo (Fp). Al utilizar tanto el análisis dinámico para diagnosticar un problema en un rotor se tiene un alto nivel de confianza, especialmente cuando se tiene que sacar un motor importante de servicio. (Análisis de las zonas de falla de Motores Eléctricos, 2008).

La figura 11, muestra problema en un rotor obtenido mediante un análisis de corrientes.

Figura 11. Prueba dinámica falla en rotor



Fuente. Hidalgo, 2008

- **Frecuencia característica para espectro de corriente con barras rotas.** Se define que las barras rotas originan componentes de corrientes inducidas al estator con presencia de bandas laterales ubicadas al doble de la frecuencia de deslizamiento.

$$2 \cdot f_2 = 2s \cdot f_1$$

Alrededor de la frecuencia fundamental f_1

$$f_{sb} = f_1(2s \cdot f_1)$$

$$f_{sb} = f_1(1 \pm 2s) \quad (6)$$

Donde.

f_{sb} : Frecuencia característica por barras rotas (para espectro de corriente)

f_1 : Frecuencia de red

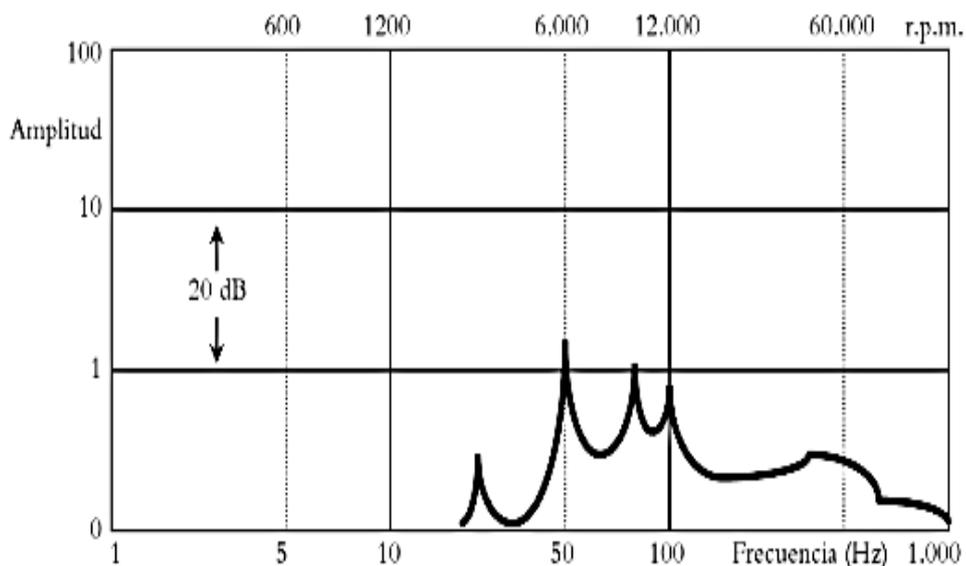
s : Deslizamiento

2.3.3 Diagnóstico técnico en motor con excentricidad estática

2.3.3.1 *Análisis de vibraciones mecánicas generadas por excentricidad estática.* Si el espacio de aire no está uniforme, las fuerzas en el rotor no son balanceadas y esto resulta en una alta vibración inducida magnéticamente a 120 Hz. La atracción magnética es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre el estator y el rotor, y por eso, una pequeña excentricidad causara una vibración relativamente importante. (WHITE, 2010)

- **Espectros resultantes.** La excentricidad estática de rotores da siempre lugar a componente netas de frecuencia igual al doble de la frecuencia de la red, es decir, 100 Hz en Europa, y 120 Hz en Estados Unidos. (CUATRECASAS, 2010).

Figura 12. Espectro típico de excentricidad estática



Fuente. Cuatrecasas, 2010

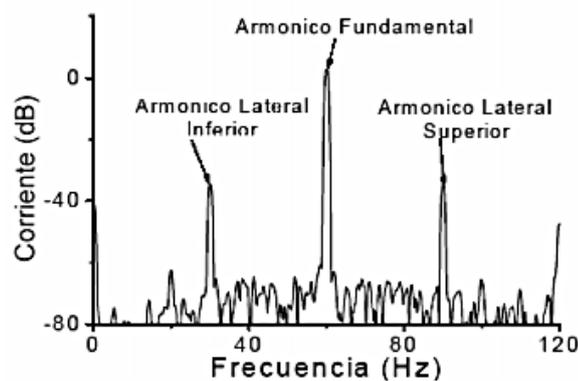
2.3.3.2 *Análisis de la corriente del estator con excentricidad estática.* En las máquinas rotatorias, cualquiera de los dos tipos de excentricidad los efectos producidos sobre su funcionamiento son los mismos. (FERNÁNDEZ, 1998)

- 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 de la máquina refleja claramente los efectos de la excentricidad, por el hecho de que este análisis permite detectar variaciones en la señal de muy pequeña amplitud (FERNÁNDEZ, 1998).

Para dicho análisis en el dominio de la frecuencia se emplea la FFT que es un algoritmo para el cálculo aproximado de la transformada discreta de Fourier. Esta técnica se ha empleado desde hace varios años en el diagnóstico de motores 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 situados al lado de la frecuencia fundamental. A estas frecuencias se les llama 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. (diagnóstico de Fallas en Máquinas Eléctricas Rotatorias Utilizando la Técnica de Espectros de Frecuencia de Bandas Laterales, 2011).

Figura 13. Armónicos lateral inferior y lateral superior de las corrientes



Fuente. Flores, 2011

- **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. (DUQUE, 2005)

$$f_{exc} = \left[(R \pm n_d) \frac{1-s}{p} \pm k \right] f_1 \quad (7)$$

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 : Numero de pares de polos

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

2.3.4 *Analizador de vibraciones mecánicas.* Las etapas de análisis se han visto modificadas sustancialmente en los últimos años, pasando de analizadores analógicos, digitales o de FT al análisis generalizado mediante ordenador, existiendo muy diversas aplicaciones en el mercado y casas especializadas que suministran el software para ese uso. (GONZÁLEZ, 2005)

Las primeras herramientas para el análisis de vibraciones utilizadas aparecieron al comienzo de los años 50. Eran analizadores de vibraciones que se utilizaban sólo para ayudar a resolver los problemas más graves de las máquinas y frecuentemente, después de que se hubieran manifestado serios síntomas de la existencia de tales problemas. Más tarde, se empezaron a utilizar para efectuar un seguimiento periódico del estado de salud de las maquinas. En la actualidad es la técnica más utilizada para detectar y diagnosticar los fallos en maquinaria rotativa y los programas informáticos son las herramientas más utilizadas.

Actualmente existen dos tipos principales de analizadores de vibraciones, los que no almacenan ni gestionan las medidas, son medidores de valor global que permiten medir el nivel de vibración del punto que se desee y los analizadores que pueden representar la señal temporal y espectral. Un analizador de vibraciones mecánicas, en forma inicial mide y registra la señal de onda, que se mantiene continua en el tiempo para luego transformarla en una señal discreta. Los espectros de vibraciones, necesitará entender con profundidad, los principios básicos que rigen la adquisición digital de los registros vibroacústicos y las particularidades del procesamiento FFT de estos. (CUATRECASAS, 2010)

2.3.4.1 *La transformada rápida de Fourier (FFT)*. El núcleo central del análisis de señales y del análisis de sistemas es propiamente dicho, el análisis por Fourier de señales discretas, cuyo sustento matemático está avalado por las relaciones siguientes:

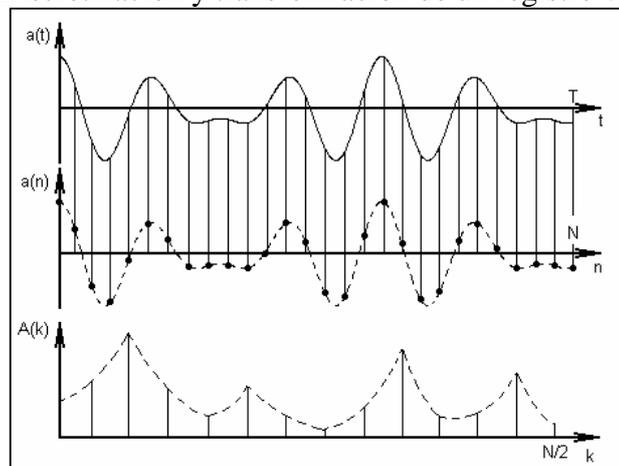
$$A(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} a(n) \cdot e^{-j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (8)$$

$$a(n) = \sum_{k=0}^{N-1} A(k) \cdot e^{j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (9)$$

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, 2007). El par de ecuaciones (8) y (9) se conoce con el nombre de transformada discreta de Fourier (DFT) cuya aplicación a un segmento de N muestras se representa en la figura 14.

Figura 14. Discretización y transformación de un registro vibroacústico.

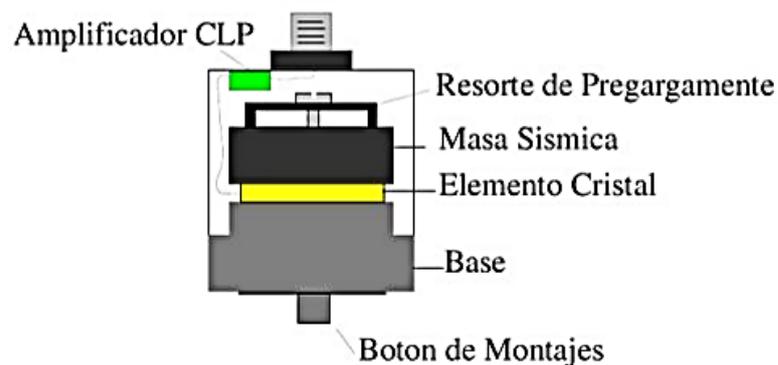


Fuente. Palomino, 2007

2.3.5 *Acelerómetro piezo-eléctrico.* Se puede considerar al acelerómetro piezo-eléctrico como el transductor estándar para medición de vibraciones en máquinas. Se produce en varias configuraciones, pero la figura 15 muestra un tipo a compresión sirve para describir el principio de la operación. La masa sísmica esta sujeta a la base con un perno axial, que se apoya en un resorte circular. El elemento piezo-eléctrico está ajustado entre la base y la masa.

Cuando una materia está sujeta a una fuerza se genera una carga eléctrica entre sus superficies. Hay muchas materias de este tipo el cuarzo se utiliza más, también hay materias piezo-eléctricos de origen sintético que funcionan bien y en algunos casos son capaces de funcionar a temperaturas más altas que el cuarzo lo puede hacer. (WHITE, 2010).

Figura 15. Constitución de un acelerómetro



Fuente. White, 2010

CAPÍTULO III

3. CRITERIOS DE SELECCIÓN Y MONTAJE DE SIMULADORES DE FALLAS

El diseño del módulo de pruebas sigue una estructura de pasos lógicos y físicamente compatibles entre elementos constitutivos del simulador de fallas, a fin de obtener el resultado satisfactorio de potencia, corriente, voltajes y más variables desarrollados durante las pruebas y tomas de datos, para lo cual parte de este capítulo está dedicado al desarrollo explicativo de construcción y adecuación de condiciones.

3.1 Sistema del módulo de pruebas

Previamente al detalle particular de los elementos constitutivos del simulador de fallas se presenta, un resumen del conjunto de sistemas inmiscuidos en el equipo, dichos requerimientos de forma conjunta nos servirán como artificio para obtener las fallas requeridas para aplicar la teoría y técnicas de análisis de variables, en un escenario de barras rotas y excentricidad estática permanente.

Tabla 2. Lista de requerimientos para simulador de falla barras rotas

Descripción	Cantidad
Motor asincrónico trifásico jaula de ardilla 0,5 HP marca WEG TE1BF	1
Alternador automotriz genérico 12V/35A	1
Polea de aluminio de 5 in de diámetro	1
Correa de transmisión tipo V, A26 13 x 660	1
Módulo regulador de voltaje 12V	1
Foco incandescente 24V, 70W	1
Conductor flexible # 16	1 m
Conductor tres líneas flexible # 16	2 m
Terminal tipo riel hembra	3
Terminal tipo riel macho	3
Terminal tipo ojo	8
Marcador para conductores	10
Interruptor automotriz	1
Enchufe 220V	1
Placa base	1

Tabla 2. (Continuación)

Tensor para alternador	1
Barra base para motor	2
Soporte u oreja para alternador	3
Perno M10 x 140, paso 1,5 Allen	1
Perno M8 x 20, paso 1,5 Allen cabeza avellanada	6
Perno M8 x 50, paso 1,5 Allen cabeza avellanada	4
Perno M8 x 25, paso 1,5 Allen	4
Perno prisionero M8 x 20, paso 1,5 Allen	3
Perno prisionero M6 x 8, paso 1 Allen	4
Tuercas M8, paso 1,5	6
Base para acelerómetro Ø22 x 6, M6, paso 1	4
Eje roscado M8 x 135, paso 1,5	1
Prensa estopa M14	6
Etiqueta de señalización	12

Fuente. Autor

Tabla 3. Lista de requerimientos para simulador de falla con excentricidad estática permanente

Descripción	Cantidad
Motobomba Century 0,37kW clase B	1
Interruptor Camsco PWN 30A, 3,7kW, 600W	1
Cable conductor gemelo calibre 14	2m
Enchufe monofásico 15A, 15V	1
Codo de PVC, 1in	4
Neplo corrido PVC, 1in	6
Unión PVC, 1in	1
Unión universal PVC, 1in	2
Válvula de globo, 1in	1
Unión tipo T con reducción 1in a 1/2in, PVC	1
Bushing 1/2in a 1/4in	2
Manómetro 0 a 100 psi, rosca 1/4	1
Unión roscada 3/4in a 1in	1
Unión en T, 3/4 in	1
Tapón 1/4 PVC	1
Neplo corrido PVC, 3/4 in	2
Unión PVC, 3/4in	1
Válvula de globo 3/4 in	1
Neplos PVC, 20cm x 1in	3
Bushing 1 in a 3/4 in	1

Tabla 3. (Continuación)

Terminal de brida roscada ¾ in	2
Recipiente reservorio cap. 10 lts	1
Refrigerante automotriz verde	2 gls
Estructura de soporte metálico 30x30x56 cm	1

Fuente. Autor

3.2 Criterios de selección de sistemas para módulo simulador con barras rotas

3.2.1 *Selección de sistema de potencia para modulo con barras rotas.* Para la creación del módulo simulador de fallas se eligió un motor jaula de ardilla asincrónico, con una potencia nominal de ½ HP. Las características constructivas y funcióneles de esta máquina hacen que sea el motor seleccionado para llevar a cabo el presente proyecto.

La máquina se seleccionó bajo un criterio de seguridad y ergonomía, al trabajar con la potencia más baja disponible en estos equipos, se garantiza en gran medida un trabajo y actividades con valores nominales bajos de voltaje, intensidad, potencia y velocidad, esto genera un grado de seguridad aceptable, además del relativo tamaño y pesos pequeños, se logra una manipulación cómoda tanto para el operario como así también para el montaje de equipos de análisis que se van a utilizar.

Figura 16. Motor Eléctrico Trifásico WEG 1/2 HP



Fuente. Autor

A continuación se detalla las características técnicas del motor en mención.

Tabla 4. Datos técnicos de motor

Característica	Valor	Unidad
Modelo	TE1BFOXOI	-
Serie	1018971408	-
Corriente	2.21/1.28	A
Voltaje	220/380	V
Potencia	0.50	HP
Frecuencia	60	Hz
Velocidad	1680	Rpm
Rendimiento	70	%
Factor de potencia	0.69	-
Temperatura amb.	-20 - +40	°C
Altitud	1000	msnm
Polos	4	-
Deslizamiento	5.56	%
Protección	IPW55	-
Masa	10	Kg
Ruido	47	dB (A)
Rodamientos	6202 ZZ	-

Fuente. Hoja de datos WEG, motor de jaula 2015

3.2.2 *Selección de sistema de carga.* La condición fundamental para la medición, seguimiento y evaluación de variables en el motor asincrónico de rotor de jaula, es que éste se encuentre sometido a un régimen de trabajo óptimo o a plena carga, el criterio técnico que se debe aplicar en motores eléctricos, es de utilizar entre un 70 a 80 por ciento de la potencia nominal del motor. En función a este requerimiento se debe diseñar un sistema consumidor que requiera un trabajo mecánico, el cual será tomado del eje del motor que se va a estudiar.

En tal virtud y previo a un análisis de magnitudes eléctricas se establece como carga adecuada el accionamiento de un alternador automotriz de características que más adelante se explican, esta máquina actúa como un freno magnético que se opone a la fuerza libre que engendra el motor de jaula, logrando así el requerimiento de carga para el motor.

En conclusión el alternador toma la energía mecánica que produce el motor y la transforma en corriente alterna que luego será transformada en corriente continua, que se aprovechara en cargas menores como focos incandescentes o motores en el caso de un automóvil, algo similar se tiene que lograr en el funcionamiento del módulo simulador de fallas, con el objetivo de establecer una carga adecuada para el motor.

Figura 17. Alternador automotriz (carga)



Fuente. Autor

El funcionamiento y reacción de los alternadores es particular para cada unidad construida por cuestiones de manufactura y estructura de cada elemento constituyente, por lo cual antes de someter el alternador a trabajo los fabricantes proporcionan información técnica de medida de variables que otorga la máquina. El test de funcionamiento del alternador nos ayudara a la selección adecuada de velocidad y carga necesaria a fin de establecer un conjunto motor carga, con valores establecidos y aceptables.

Tabla 5. Valores de test computacional del alternador

Característica	Valor	Unidad
Modelo	23100-U0100	-
Voltaje nominal	12	V
Corriente nominal	35	A
Voltaje aplicado	13,5	V
Velocidad aplicada	2500	Rpm
Velocidad mín. requerida	1800	Rpm
Potencia máx. desarrollada	579	W
Corriente máx desarrollada	43	A
Corriente de campo	2,99	A
Corriente de fuga	0,37	A
Voltaje de salida en estator	6,72	V

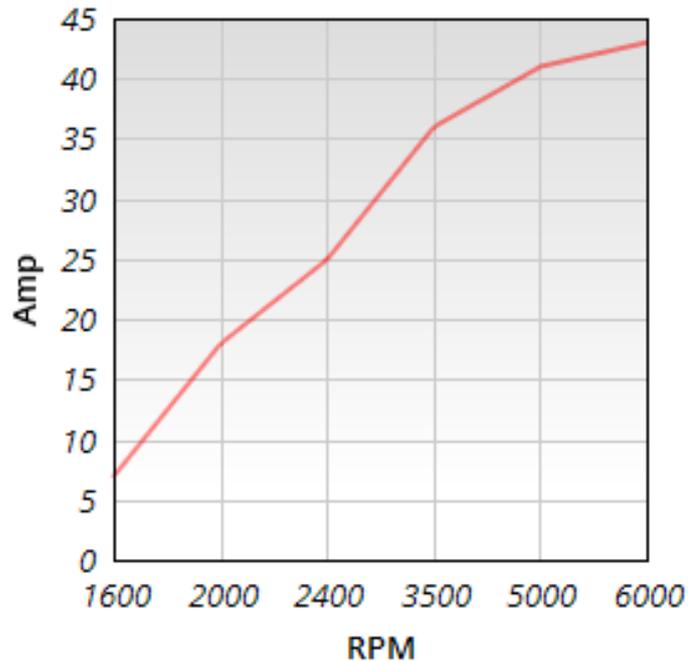
Fuente. Hoja técnica alternador

Tabla 6. Corriente de salida a prueba con 13,5 voltios

RPM	1600	2000	2400	3500	5000	6000
Amperaje	7	18	25	36	41	43

Fuente. Hoja técnica alternador

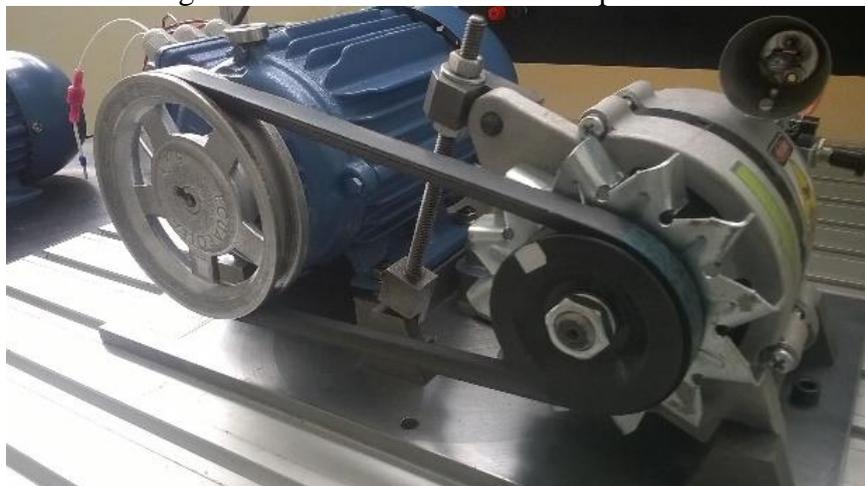
Figura 18. Valores de intensidad a diferentes velocidades de giro



Fuente. Hoja técnica alternador

3.2.3 *Selección de sistema de transmisión.* La transmisión de potencia por correa, se establece como uno de los sistemas más utilizados dentro de estos fines, el fácil montaje y la bajas pérdidas en proceso, son razones fundamentales para su utilización, para el ensamblaje del módulo simulador de fallas, se va a instalar este sistema, en el lado de potencia estará presente una polea de un determinado diámetro, y en lado de la carga una polea de un diámetro función de la primera. Este tipo de transmisión de potencia y movimiento cumplen con las condiciones establecidas para la correcta operación del sistema y la medida de variables.

Figura 19. Sistema de transmisión por correa



Fuente. Autor

3.2.4 *Selección de polea.* La polea que debemos elegir se seleccionara en función a la polea instalada de fábrica, con la que cuenta el alternador a utilizar, y el tipo de correa que dispongamos, notamos el dato de la velocidad nominal del motor, a fin de establecer por medio de los cálculos de relación de transmisión una velocidad adecuada en el lado de la carga. La velocidad del alternador debe ser mucho mayor que la velocidad del motor, solo así podrá generar la corriente y carga suficiente, que nos permita cumplir con las condiciones de trabajo del sistema, para esto vamos a trabajar con un aumento de velocidad con razón de 1 a 2.

Cálculo para diámetro de polea mayor D , en función a velocidad nominal del motor.

$$v_m = 1680 \text{ rpm}$$

$$d = 71,2 \text{ mm}$$

Sí: $v_m = 1680 \text{ rpm} = n$, aplicando razón 1 a 2, entonces $N = 3360 \text{ rpm}$

$$R = \frac{N}{n} \tag{8}$$

$$R = \frac{3360 \text{ rpm}}{1680 \text{ rpm}}$$

$$R = 2$$

$$D = d \cdot R$$

$$D = 71,2 \times 2$$

$$D = 142,4 \text{ mm} = 5,6 \text{ in}$$

Donde

v_m : Velocidad nominal del motor

d : Diámetro nominal polea del alternador

R : Relación de transmisión

D : Diámetro de polea mayor o lado libre del motor

Por factores de construcción comercial, la polea mayor que se acoplara al lado libre del motor es de 5 pulgadas americanas de diámetro, la cual está construida en aluminio fundido, que evita la carga inercial por masa.

3.2.5 *Selección de la correa de transmisión.* Se ha seleccionado una correa de transmisión de potencia a de tipo trapezoidal (V), basados en la potencia de trabajo baja y el montaje sencillo del elemento, la elección de este tipo de correa es lo suficientemente adecuada para lograr el objetivo señalado en el desarrollo del presente proyecto.

La correa esta fortalecida con una cubierta laminar conformada por algodón y poliéster, impregnada con neopreno (caucho), gracias a sus características de diseño y construcción, soporta bastante bien los cambios de temperatura de trabajo y ambientales, así como una buena resistencia ante la presencia de fluidos como aceites u otros, lo cual alarga la vida útil del elemento. Este tipo de correa Super Blue Ribbon está en la capacidad de resistir la fatiga por flexión, y puede soportar mayor carga, por tal motivo este tipo de banda es la elección correcta para un rendimiento confiable y económico en el módulo de pruebas.

Cálculo de la longitud primitiva de la correa

Datos.

$$D = 122,4$$

$$d = 71,2$$

$$L_p = 2E + \frac{\pi}{2}(D + d) + \frac{(D-d)^2}{4E} \quad (10)$$

$$L_p = 2(203) + \frac{\pi}{2}(122,4 + 71,2) + \frac{(122,4 - 71,2)^2}{4(203)}$$

$$L_p = 713,33 \text{ mm} = 28,08 \text{ in}$$

Donde.

L_p : Longitud primitiva de la correa

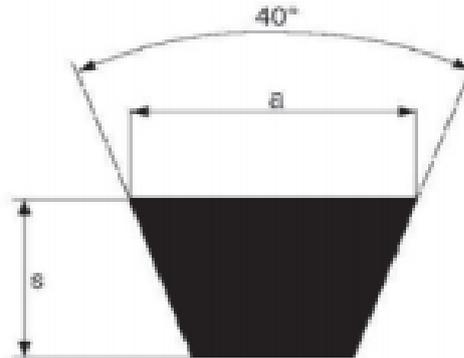
D : Diámetro primitivo de polea seleccionada de 5 in, comercial

d : Diámetro primitivo polea alternador

E : distancia entre ejes (203 mm)

Del cálculo llegamos a la selección de una correa de tipo comercial de marca DAYCO – gold Label V MM a 26 13x660.

Figura 20. Correa de tipo trapezoidal



LEYENDA:

a = ancho de la base mayor
 s = espesor de la correa

Fuente. Catalogo DAYCO

Tabla 7. Especificaciones de tipo de bandas

Sección	a (mm)	s (mm)
Z	10	6
A	13	8
B	17	11
C	22	14
D	32	19
E	40	25

Fuente. Catalogo DAYCO

Tabla 8. Fragmento de especificaciones de correa A26

Sección "A" (13x8 mm)		
Tipo	Desarrollo interior mm	Desarrollo primitivo mm
A 26	660	693

Fuente. Catalogo DAYCO

En las tablas 7 y 8, podemos mirar los detalles específicos proporcionados por los fabricantes y se corrobora con los cálculos obtenidos, llegando a la elección más adecuada de la correa de transmisión de tipo comercial.

3.2.6 *Selección de sistema eléctrico.* Es necesario una correcta elección del sistema eléctrico y de conducción, para aquello tendremos que basarnos en datos de placa o cálculos de intensidad de arranque y trabajo, a fin de utilizar los conductores más adecuados para la consecución de las instalaciones cableadas. Para una adecuada selección del conductor se debe realizar el cálculo de intensidad para circuitos trifásicos, dada en la siguiente formula.

$$I = \frac{P_n}{\sqrt{3} * U * \text{Cos}\varphi} \quad (11)$$

Donde.

$$P_n = 0,5 \text{ HP} = 370 \text{ W (potencia nominal del motor)}$$

$$U = 220 \text{ V}$$

$$\text{Cos}\varphi = 0,69$$

Por lo cual obtendremos:

$$I = \frac{370 \text{ W}}{\sqrt{3} * 220 \text{ V} * 0,69}$$

$$I = 1,4 \text{ A}$$

Según la instrucción ITC-BT-47 del Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión (REBT), los conductores de conexión que alimentan a un solo motor deben estar dimensionados para una intensidad del 125 % de la intensidad a plena carga del motor. Por tanto, la intensidad obtenida tendremos que multiplicarla por 1,25, quedando:

$$I_m = 1,4 * 1,25 = 1,75 \text{ A}$$

Donde:

I_m : Intensidad de un motor a plena carga

Finalmente la elección del conductor en función a la intensidad obtenida es uno número 16 AWG, con capacidad de corriente de hasta 3,7 A. se utilizara el conductor de tipo cordón con tres líneas internas aisladas individualmente con un régimen de trabajo de 20

a 40°C. y con resistencia a condiciones de humedad y con baja emisión de humo.

Tabla 9. Tabla de calibres para conductores AWG

AWG	SWG	Diámetro	Amperaje max.	220V KW	110V KW
1	2	7,01 mm	119	26,18	13,09
3	4	5,89 mm	75	16,50	8,25
4	6	4,88 mm	60	13,20	6,60
6	8	4,06 mm	37	8,14	4,07
8	10	3,25 mm	24	5,28	2,64
10	12	2,64 mm	15	3,30	1,65
12	14	2,03 mm	9,3	2,05	1,02
13	15	1,83 mm	7,4	1,63	801 watts
14	16	1,63 mm	5,9	1,30	650 watts
15	17	1,42 mm	4,7	1,03	115 watts
16	18	1,22 mm	3,7	814 watts	407 watts

Fuente. <http://tarielkapanadze.ru/kelly3-2.htm>

3.2.7 *Regulador de voltaje.* Para lograr la carga necesaria para el motor eléctrico no basta únicamente con la carga inercial y magnética que produce el alternador es necesario aplicar cargas eléctricas o consumidores al alternador, aumentando la solicitud de potencia total que se toma del eje del motor, bajo esta observación y previo un análisis de consumidores, se instalará un regulador de voltaje electrónico. La función de este elemento en un automóvil es mantener constante el voltaje que genera el alternador independientemente de la velocidad de giro del motor. En el caso del módulo de pruebas cumple dos objetivos que es preservar la vida útil de los consumidores (foco incandescente), y aportar por sí mismo una carga adicional al sistema.

Figura 21. Regulador de voltaje



Fuente. Autor

3.2.8 *Carga adicional.* Finalmente, al tratarse de un sistema de carga experimental, se analizara y probara varios dispositivos consumidores o generadores de carga, que se acoplan al alternador antes mencionado, llegando a la elección e instalación de un bombillo de filamento incandescente, este elemento consume una cierta cantidad de potencia, que aunque se trata de un valor mínimo fundamenta la carga total solicitada al motor, logrando establecer las condiciones de operación o solicitudes técnicas para el proceso de análisis de variables en nuestros módulos simuladores de falla.

3.3 Criterios de selección de sistemas para módulo simulador con excentricidad estática permanente

3.3.1 *Selección de sistema de potencia para modulo con excentricidad estática permanente.* Para la consecución del módulo simulador de falla con presencia de excentricidad estática, se eligió una motobomba monofásica de tipo centrifuga, con una carga y descarga nominal de 1 pulgada a la entrada y descarga de la voluta de la bomba.

El motor de la bomba posee una excentricidad estática de forma permanente, por lo cual este módulo actuará de modo diferente al módulo de barras rotas, la condición de experimentación para este caso, es la variación de la carga mediante el aumento de presión de bombeo, a través de la estrangulación del caudal de descarga del circuito de bombeo por acción de una válvula de esfera. El objetivo del proceso experimental es analizar el comportamiento del armónico fundamental de falla en función a la variación de la carga, entendiendo la dinámica del estudio armónico de vibraciones mecánicas y del análisis espectral de la corriente de alimentación del estator.

Figura 22. Motobomba con presencia de excentricidad estática permanente



Fuente. Autor

Tabla 10. Especificaciones motobomba monofásica

Marca	Century	Voltaje	110V
Modelo	QB60	Max. Altura	20m
Max. Caudal	25 L/min	f. nominal	60Hz
Clase B	IPX4	Potencia	0,37kW
	16μF	Giro	3400rpm

Fuente. Hoja de datos técnicos CENTURY

3.3.2 *Selección de sistema de carga para motobomba centrífuga.* Como se han venido realizando tradicionalmente los sistemas de carga para una bomba de fluido, se decidió realizar la construcción de un sistema cerrado de bombeo el cual lleva a la maquina a realizar su función fundamental, mover fluido de un punto a otro por medio de una línea de carga y descarga debidamente ensamblada siguiendo los parámetros de mantenibilidad y control.

Figura 23. Diagrama de bombeo en circuito cerrado



Fuente. Autor

3.3.3 *Selección de elementos de transporte de fluido y elementos de control.* Las tuberías tanto de carga y descarga debido a la entrada y salida nominal de la voluta es de

1 pulgada, por lo cual se ha seleccionado elementos de esta dimensión los mismos que se encuentran especificados en la tabla 3.

Los accesorios fundamentales presentes en el módulo de prueba, son los neoplos, codos, uniones universales, válvulas de esfera y manómetro, la mayoría de los accesorios mencionados están fabricados de material PVC, con excepción de las válvulas de esfera que están construidas en hierro galvanizado, y el manómetro que está construido internamente por elementos de cobre y externamente por chapa metálica.

3.3.4 *Selección de elementos eléctricos.* La selección de los elementos eléctricos como arrancador y conductor para línea de alimentación se la realizo en función a la intensidad presente en la bomba, dicha intensidad se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$P = V \cdot I \quad (12)$$

Despejando la intensidad obtenemos:

$$I = \frac{P}{V}$$

Datos.

$$P_n = 0,37kW = 370W$$

$$V_n = 110V$$

Donde.

P_n : Potencia nominal del motor de la bomba

V_n : Voltaje nominal de la bomba

Reemplazando:

$$I = \frac{370 W}{110 V}$$

$$I = 3,36 A$$

Siguiendo los criterios presentados en la tabla 9, se eligió un cable conductor de dos líneas aislados mutuamente de tipo AWG 16, cuya intensidad nominal de trabajo es de 3,7 amperios y con rango de temperatura de 20° a 40°, estos rangos caben dentro de la intensidad calculada. Se seleccionó un instalador de marca Camsco, con una capacidad máxima de corriente de 30 amperios y transporte de 600V, aunque se trata de un arrancador muy robusto cabe mencionar que se empleó este dispositivo debido a la disponibilidad del mismo.

Figura 24. Arrancador y cable conductor empleado en módulo de excentricidad estática



Fuente. Autor

3.3.5 *Selección de fluido a mover.* El fluido que se debe mover y emplear en el módulo, se eligió siguiendo parámetros de conservación de los elementos, accesorios y componentes internos de la bomba, a fin de garantizar una vida útil a largo plazo sin que sufra modos de fallo como corrosión y daños en los elementos.

El fluido adecuado para depositar en el equipo, es refrigerante automotriz el cual posee características físicas que no permiten el acción del oxígeno sobre los elementos metálicos, también evita la evaporación puesto que el punto de ebullición de dicho fluido es más elevado que el punto de ebullición del agua común, aunque comparten similar densidad, ésta característica ultima resulta muy útil a fin de simular un bombeo con agua. Las características por las cuales este fluido se eligió son las siguientes: previene recalentamiento, amigable al medio ambiente, no es inflamable, biodegradable, listo para usar, seguro, económico, lubricante.

Tabla 11. Especificaciones de fluido para bomba

Marca	Freezetone
Tipo	Verde fluorescente
Densidad	1 g/cm ³
pH	10,6
Gravedad específica	1,002 – 1,006
Contenido	3,785 L

Fuente. FREEZETONE Products, Inc, 2009

3.3.6 *Selección de material para estructura de soporte.* El material para la construcción de la estructura que soporta el peso de todos los dispositivos debe brindar una resistencia adecuada con robustez, pero que no represente demasiado peso. Por lo expuesto se decidió el empleo de tubo cuadrado de ½ pulgada de medida nominal, para luego fabricar una estructura en forma de cubo, en donde si dispondrán adecuadamente todos los elementos constitutivos a fin de obtener el módulo de pruebas ensamblado como se indica en la figura 23.

3.4 Cálculo de potencia

3.4.1 *Cálculo de la potencia para motor con barras rotas.* Se deben cumplir ciertas condiciones de operación en el motor, a partir de éstas se tiene que construir un artificio o mecanismo que lleve al motor a un funcionamiento a plena carga, en tal virtud se ha seleccionado un alternador automotriz que será empujado por la energía mecánica que se produce en el eje del motor en funcionamiento.

En busca de métodos más efectivos de generación de carga, se hace muy cómodo el empleo de un alternador, la transmisión de potencia es bastante sencilla además de las conexiones propias del elemento.

Para comenzar con el cálculo de la velocidad adecuada debemos tomar en consideración la potencia que entrega el motor y la velocidad de giro de éste, lo cual se describe en adelante a fin de comprender como se debe realizar el montaje y seleccionamiento de los elementos constitutivos del módulo simulador de falla. Para llegar a la correcta elección de carga para los dos escenarios o modelos de módulos de falla, es necesario hacer un análisis en función de los datos entregados por los fabricantes del motor eléctrico que vamos a utilizar.

Análisis de potencia que se debe medir en la entrada de los motores.

Datos

$$P_n = 370 W$$

$$ef = 70\%$$

$$R = (70\% \text{ a } 80\%)P_n \text{ (Condición de carga normal para motores de rotor de jaula)}$$

Donde.

P_n : Potencia nominal del motor.

ef : Eficiencia del motor.

R : Rango óptimo de funcionamiento en función a potencia nominal.

Cálculo de R :

$$P_n = 370 W$$

$$R_0 = 370W \times 0,7 = 259W$$

$$R_1 = 370W \times 0,8 = 296W$$

$$R = \overline{R_0 - R_1}$$

$$R = \overline{259 - 296} W$$

Finalmente el rango adecuado de potencia en la entrada del motor R_m tomando en consideración la eficiencia del motor, quedara establecido de la siguiente manera:

$$ef = 70\%$$

$$\begin{array}{ll} 70\% & 259W \\ 100\% & x_0 = 370W \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} 70\% & 296 W \\ 100\% & x_1 = 422,8 W \end{array}$$

$$R_m = \overline{x_0 - x_1}$$

$$R_m = \overline{370 - 422,8} W$$

Expresando R_m como el rango permisible de potencia medida en la entrada o conexión del motor. En conclusión la potencia requerida a la entrada del motor P_e queda establecida como:

$$P_e = 410W$$

Método analítico para calcular la potencia entrante en el motor. La magnitud que podemos variar en función a la aplicación de carga externa al motor, es la corriente de entrada por lo cual obtenemos la ecuación necesaria a partir de la ecuación de la potencia en circuitos trifásicos.

$$P = V.I.\sqrt{3}.cos\varphi \quad (13)$$

Despejando la intensidad obtenemos la ecuación (11)

$$I = \frac{P}{V.\sqrt{3}.cos\varphi}$$

Nótese que el factor de potencia $cos\varphi$ varía en función a la carga, con un determinado crecimiento exponencial, publicado en la hoja de datos técnicos del motor utilizado:

Tabla 12. Variación de factor de potencia en función a la carga

Carga	Factor de potencia	Rendimiento (%)
100 %	0,66	67,0
75 %	0,55	66,0
50 %	0,44	60,0

Fuente. Hoja técnica WEG

La condición de funcionamiento del motor es trabajar a un 80% de la carga según las recomendaciones técnicas proporcionadas por el fabricante, es necesario calcular el factor de potencia real bajo este porcentaje de carga, se debe interpolar los valores para hallar el factor de potencia real.

$$\begin{array}{r} 100 - 75 = 25 \\ 100 - 80 = 20 \\ \hline 20 \\ \hline 25 \end{array}$$

$$0,66 - 0,55 = 0,11$$

$$0,11 * 0,8 = 0,088$$

$$x = 0,66 - 0,088 = 0,572$$

Donde

x : Factor de potencia real

$$\cos\varphi_{real} = 0,572$$

Determinación de corriente entrante

Datos.

$$P = P_e = 410W \text{ (condición de potencia)}$$

$$V = 207 \text{ (voltaje real de línea, medido en terminales)}$$

$$\cos\varphi = 0,572 \text{ (factor de potencia real)}$$

Entonces:

$$I = \frac{P}{V \cdot \sqrt{3} \cdot \cos\varphi}$$

$$I = \frac{410}{(207)(\sqrt{3})(0,572)}$$

$$I = 1,999$$

En conclusión la corriente que debe presentar en cualquier línea debe ser aproximadamente 2 amperios, de esta manera el motor estará funcionando con carga óptima, correspondiente a la utilización de rango de potencia de entre el 70% a 80% de la carga nominal. Este resultado no es tan confiable como la medida de la potencia a través del equipo Fluke 435 II, aunque sirve como método de fácil aplicabilidad.

Figura 25. Corriente de entrada



Fuente. Autor

Figura 26. Potencias medidas en la entrada de los motores: izq. barras rotas, der. excentricidad estática



Fuente. Autor

De la figura 26, se llega a la conclusión de que la potencia medida en los terminales de conexión, es la adecuada a fin de garantizar la condición de uso óptimo de este tipo de motores.

Potencia obtenida en la correa

Datos.

$$P = P_e \times \text{eficiencia del motor}$$

$$P = 410 \times (0,7)$$

$$P = 287$$

$$K = 1,1$$

$$P_c = P \cdot K \quad (14)$$

$$P_c = 287(1,1)$$

$$P_c = 315,7 \text{ W}$$

Donde.

P_c : Potencia corregida obtenida a través de la correa

P : Potencia entregada por el motor

K : Factor de corrección

3.4.2 *Cálculo de potencia para bomba con excentricidad estática permanente.* En el caso del motor con excentricidad estática permanente, presente en el módulo de la motobomba y bajo las condiciones de experimentación no se podrá lograr una estabilización de la potencia, esto debido a que la condición fundamental para las pruebas en éste módulo, son elevar la carga de forma gradual de tal manera que en la prueba existirá un punto de baja potencia y un punto de alta potencia, cabiendo en un parámetro inadecuado en ambos casos, sin embargo se debe determinar un punto óptimo de carga siguiendo las recomendaciones técnicas de uso para motores eléctricos de este tipo, es decir llegar a la carga del motor del 80% de la carga nominal.

Análisis de potencia adecuada que se debe medir en la entrada del motor de la bomba

Datos.

$$P_n = 370 \text{ W}$$

$$ef = 80\%$$

$$R = (70\% \text{ a } 80\%)P_n \text{ (Condición de carga normal para motores de rotor de jaula)}$$

Donde.

P_n : Potencia nominal del motor.

ef : Eficiencia del motor.

R_b : Rango óptimo de funcionamiento para motobomba en función a potencia nominal.

Cálculo de R_b :

$$P_n = 370 W$$

$$R_0 = 370W \times 0,7 = 259W$$

$$R_1 = 370W \times 0,8 = 296W$$

$$R_b = \overline{R_0 - R_1}$$

$$R_b = \overline{259 - 296 W}$$

Finalmente el rango adecuado de potencia en la entrada del motor de la bomba R_{mb} tomando en consideración la eficiencia del motor, quedara establecido de la siguiente manera:

$$ef = 80\%$$

$$\begin{array}{l} 80\% \quad 259W \\ 100\% \quad x_0 = 323,75W \end{array}$$

$$\begin{array}{l} 80\% \quad 296 W \\ 100\% \quad x_1 = 370 W \end{array}$$

$$R_{mb} = \overline{x_0 - x_1}$$

$$R_{mb} = \overline{323,75 - 370 W}$$

3.4.2.1 *Test de medida de variables en motobomba con diferentes cargas.* Con la intención de identificar la carga de la bomba, la cual equivale a una carga de aproximadamente de 70% al 80% de la potencia nominal cumpliendo con la recomendación para el desempeño óptimo de las maquina rotativas, se realizó un ensayo previo aislado del análisis de diagnóstico técnico, el cual se muestra en la tabla 13.

Tabla 13. Valores medidos en motobomba con instrumento Fluke 435 II

Carga [PSI]	Intensidad [A]	Potencia [W]	$\cos \varphi$
0	2,44	232,5	0,79
5	2,47	244,4	0,81
10	2,54	253,4	0,83

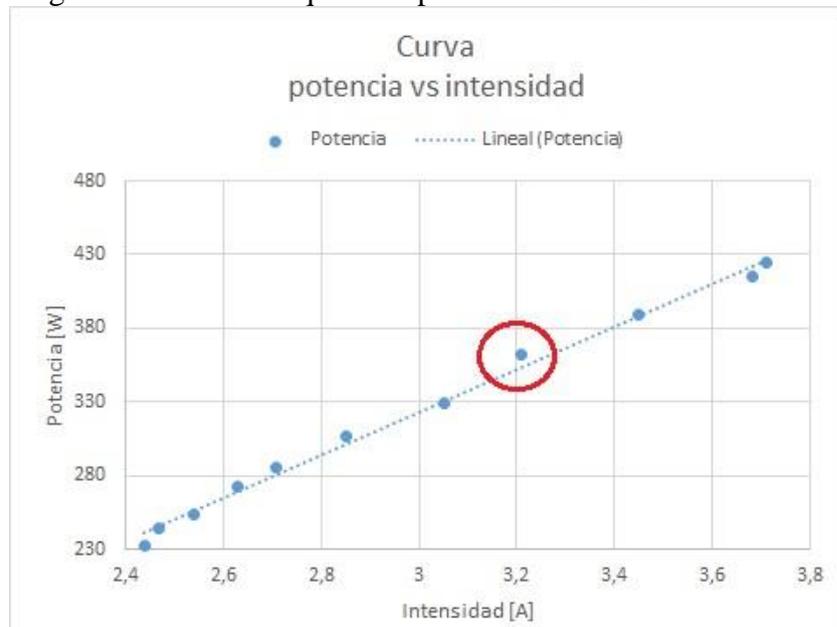
Tabla 13. (Continuación)

15	2,63	272,8	0,85
20	2,71	285,4	0,88
25	2,85	306,8	0,90
30	3,05	329,5	0,91
35	3,21	362,5	0,93
40	3,45	388,9	0,94
45	3,71	424,5	0,95
48	3,68	415,3	0,95

Fuente. Autor

Del test de funcionamiento se obtiene el valor de carga más adecuado, en donde el motor se encontrara sometido a una carga optima establecida por recomendaciones técnicas, dicho rango de carga está comprendido entre los 30 a 35 psi de carga. En la figura 27, se observa el punto en donde la bomba se encuentra cargada a un 80% de la carga nominal, resultando los valores de potencia e intensidad corroborados con las magnitudes calculadas mediante la ecuación 12 y el valor R_{mb}

Figura 27. Punto de equilibrio potencia vs intensidad en bomba



Fuente. Autor

3.5 Construcción de módulos simuladores de falla

3.5.1 *Motor con barras rotas.* El motor trifásico asíncrono de rotor de jaula, lo tenemos que someter a daños en el rotor, específicamente una de las barras de

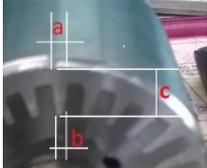
cortocircuito se verá dañada de forma artificial practicando un mecanizado de perforación en una de sus barras, de esta manera se espera obtener las lecturas de variables correspondientes a estos tipos de daños.

La segunda fase del daño provocado es llegar a obtener una segunda y una tercera barra rota, un total de tres barras se verán afectadas a fin de identificar la dinámica de los armónicos característicos de falla correspondientes a las barras rotas, finalmente procederemos a realizar una rosca M6, en los tres agujeros de cada barra dañada, en donde se alojaran pernos prisioneros con la finalidad de analizar que sucede con el análisis de los armónicos en el espectro de velocidad para vibraciones mecánicas, y espectro de la corriente en el análisis espectral de la corriente de alimentación al estator.

Sin mayor complicación a este motor lo vamos a desarmar, desmontando las dos tapas del lado del eje y del lado libre, a fin de tener el rotor a un lado, para posteriormente realizarle el mecanizado previamente mencionado, para nuevamente ensamblar el motor tal como estuvo al inicio, las conexiones eléctricas y la adaptación de las bases cilíndricas en donde se apoyaran las bases magnéticas de los acelerómetros medidores de vibración, se mantienen durante todo el ensayo.

La medida del agujero practicado tendrá que ser función de las medidas de diseño de la barra de cortocircuito, el diámetro de la herramienta (broca) será mayor al ancho de la cabeza de la barra, mientras que la profundidad del agujero o longitud de penetración de la herramienta, también tendrá que ser mayor a la profundidad de barra que disponga este tipo de rotor igual a 9,5 mm de esta manera se asegurara un corte de conducción en una barra determinada, para así simular satisfactoriamente la falla solicitada, este proceso se lo va realizar en 3 de las 28 barras del rotor.

Tabla 14. Dimensiones de barra de rotor

MEDIDAS DE BARRAS			
Cantidad de barras		28	
Ítem	Descripción	Medidas [mm]	Gráfico
A	Ancho o cabeza	3	
B	Pie	1,5	
C	Longitud o altura	9,5	

Fuente. Autor

Figura 28. Perforación en una de las barras del rotor

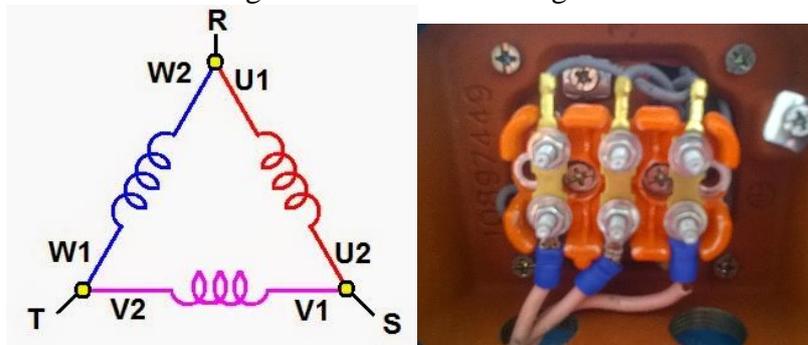


Fuente. Autor

3.5.1.1 *Instalación eléctrica en motor con barras rotas.* Una vez establecido el calibre y tipo de conductor que vamos a utilizar en la conexión del suministro eléctrico de los motores, se procede con el tipo de conexión e instalación adecuada de terminales.

Existen varias formas de conexión disponibles para los motores de rotor de jaula (MAJA), sin embargo las más utilizadas son las conocidas delta o estrella, la diferencia existente entre las dos, es el voltaje que suministra al motor, son muy visibles y diferenciables en la caja de terminales del motor. Para nuestro estudio la conexión seleccionada será una de tipo delta conocida también como triángulo, gracias al voltaje bajo de operación comprendido entre los 220 V, y la ausencia de la línea neutro que facilita el proceso de toma de medidas.

Figura 29. Conexión triángulo



Fuente. Autor

3.5.1.2 *Puntos de medición en motor con barras rotas*

- **Bases para acelerómetros.** En los bordes de las tapas del motor se tienen que fijar unos discos cilíndricos tanto en la orientación del eje de las abscisas como en el eje de las ordenadas, estos dispositivos mecánicos servirán como apoyo magnético donde se ubicaran los acelerómetros con su respectiva base magnetizada, es decir en estos puntos de apoyo se “pegaran” convenientemente dichos dispositivos

sensores, los cuales miden la intensidad de vibración generada por los motores, que posteriormente y con ayuda del software determinaran las fallas que se han practicado en los motores.

- **Puntos para análisis de corriente.** Para tomar las medidas o variables en función a la corriente de circulación, debemos tener puntos físicos de medida, al tratarse de la medida de la corriente se debe ubicar pinzas amperimétricas de línea, bajo este criterio se mecaniza la tapa de la caja de conexión del motor, a fin de exponer las tres líneas de fase en las cuales se deben identificar el sentido de la corriente entrante al motor, las pinzas que vamos a emplear también tienen un sentido de operación.

Además de lo mencionado es necesario medir la potencia que es función de la intensidad y voltaje del motor, por tanto se requiere también cables adicionales para la medición del voltaje con instrumentos convencionales como el multímetro o vatímetro, a fin de garantizar la seguridad en la toma de medidas e instalaciones adecuadas se debe sostener los conductores por medio de elementos de apoyo llamados prensaestopas. Los conductores deben estar ubicados en el centro de las pinzas amperimétricas sin cruzarse ni montarse entre conductores o pinzas a fin de obtener unas medidas adecuadas y de alta fidelidad.

Figura 30. Puntos de toma de medidas



Fuente. Autor

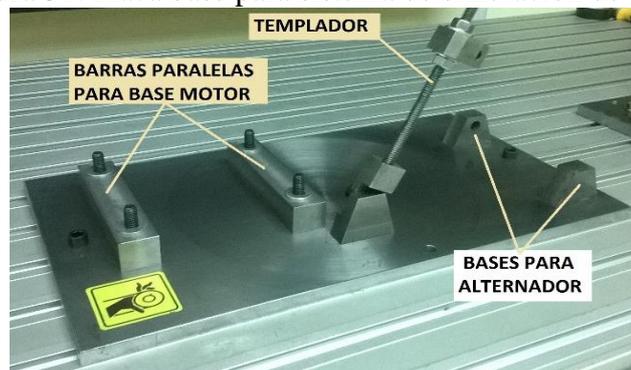
3.5.1.3 *Base o chasis de montaje para modulo con barras rotas.* La parte fundamental del módulo simulador de fallas, es la base o chasis en donde se montaran los equipos o dispositivos tanto de potencia así como el sistema de carga, es decir en esta base se

sujetaran los motores que vamos a analizar y el alternador con sus respectivos dispositivos, todo acoplados y dispuestos de la forma más organizada, segura y ergonómica, garantizando una optimización de espacio facilidad de operación y medida de variables.

Para la lograr un ensamblaje de todo el sistema, la placa base cuenta con dispositivos mecánicos (orejas) de sujeción, debidamente dimensionados y construidos a fin de lograr un montaje final satisfactorio. La placa está construida de un acero al carbono AISI 1018, posee una buena soldabilidad y ligeramente mejor maquinabilidad que los aceros con grados menores de carbono. Se presenta en condición de calibrado (acabado en frío). Debido a su alta tenacidad y baja resistencia mecánica es adecuado para componentes de maquinaria. A la placa se le practicó un mecanizado adecuado a fin de garantizar un acabado regular y medidas exactas con una geometría simétrica y escuadrada, por medio de un mecanizado circular (usando un torno), se pulió las dos caras de la plancha y con la ayuda de una fresa para refrentar se pulió los filos de la placa.

A más de lo mencionado, se realizó los respectivos agujeros de sujeción de elementos de montaje (orejas), y los agujeros de sujeción de todo el sistema a la mesa ranurada de aluminio dispuesta en el módulo de montaje y de toma de datos del laboratorio de mantenimiento predictivo. Estos últimos cumplen con la condición de que la distancia nominal de centro a centro de cualquiera de los pares de agujeros posibles, debe ser una cifra divisible para 50 milímetros, considerando las medidas nominales de paralelismo de las ranuras de la mesa, así se garantiza un montaje en cualquier sentido u orientación de la placa en la mesa ranurada, esta consideración se la toma con la intención de poder realizar prácticas futuras con más de un módulo montado a la misma mesa ranurada.

Figura 31. Placa base para sistema de simulación de fallas



Fuente. Autor

3.5.1.4 Montaje de elementos en módulo de barras rotas.

- **Montaje de poleas.** En el motor con barras rotas, se debe instalar la polea seleccionada, la polea seleccionada tiene una diámetro comercial de 5 pulgadas y está construida en aluminio fundido, previo al montaje se realizó un mecanizado del agujero central de la polea estableciendo un diámetro igual a 14 milímetros que es la medida original del eje del motor y el alojamiento para la cuña o chaveta de fijación.

En segundo lugar se realizó en la manzana de la polea tres agujeros perpendiculares al agujero del eje, cada uno tiene un ángulo de 120° en relación a cualquiera de los otros dos, a estos agujeros se les saco rosca con un machuelo M8 de paso 1,5 y representan los tres pernos prisioneros que fijan la polea al eje, la presencia de tres pernos prisioneros es muy conveniente para la alineación de la polea.

Figura 32. Colocación de polea



Fuente. Autor

- **Montaje de motor.** El motor se ancla convenientemente sobre un par de barras paralelas que sirven para darle altura al motor, a fin de que la polea no se acerque demasiado a la base, dichas barras tienen una medida de 124 milímetros de largo por 24 milímetros por cada lado.

El ajuste se da por medio de cuatro pernos M8 de 50 milímetros de largo, la cabeza de los pernos son de diseño avellanado y su ajuste se da desde la placa base pasando por las barras y el ajuste final con la base del motor.

Figura 33. Motor montado en la base



Fuente. Autor

- **Montaje de alternador.** El alternador de forma similar al montaje del motor se acopla a los dispositivos sujetadores (orejas), previamente ajustados a la base. Sin embargo el alternador en inicio no se lo sujeta de forma permanente, es decir necesita tener un desplazamiento adecuado a fin de tensar la correa de transmisión, por lo cual se acoplo un templador de 140 milímetros de distancia que se sujetara en la oreja superior del alternador y que nos servirá para el proceso antes mencionado.

Figura 34. Montaje de alternador a placa base



Fuente. Autor

- **Montaje de correa de transmisión.** Una vez que tenemos fijados el lado de potencia (Motor) y el lado de carga, se procedió con el montaje de la correa, fijando

de forma adecuada en los canales de las poleas conductora y conducida, finalmente se tensa el alternador logrando la unión cinemática de los elementos, esto lo podemos observar en la figura 35

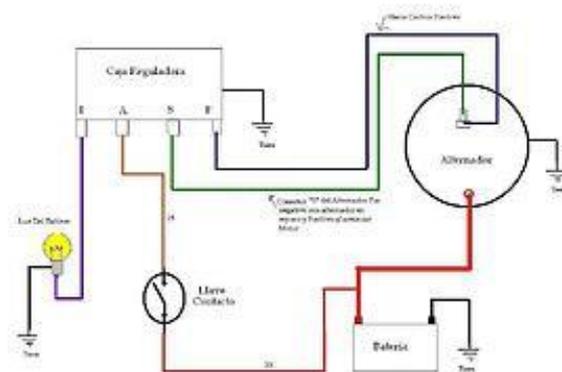
Figura 35. Modulo ensamblado de barras rotas



Fuente. Autor

- **Montaje e instalación de cargas eléctricas.** Las cargas adicionales que a su vez significan las cargas al alternador son el regulador de voltaje electrónico y un foco incandescente automotriz, se ubicaron en la parte posterior del alternador, poseen conexiones por medio de cable flexible N° 16, estos se etiquetan adecuadamente evitando posibles malas conexiones o confusiones.

Figura 36. Diagrama de conexión de cargas eléctricas



Fuente. Autor

3.5.2 *Motobomba con presencia de excentricidad estática permanente.* Con la finalidad de identificar los armónicos característicos correspondientes a la excentricidad

estática se procedió con el montaje de los elementos constitutivos del módulo de bombeo en circuito cerrado, como se indica en la figura 23, dicho modulo servirá como artificio mecánico para desarrollar la experimentación adecuada, empleando dos métodos de diagnóstico técnico, las vibraciones mecánicas y el análisis espectral de la corriente son las técnicas que se van a emplear en el presente proyecto.

Es necesario determinar un valor de frecuencia característica de falla correspondiente a la excentricidad estática mediante la ecuación 7 (frecuencia de falla para análisis de corriente), dicha ecuación es función del deslizamiento del motor que es directamente proporcional al incremento de la carga y el número de barras del rotor, por lo cual y como punto de partida es necesario identificar las características del rotor de la motobomba monofásica.

Tabla 15. Especificaciones de rotor de motor bomba

Número de barras	19
Número de bolas de rodamiento	7
Número de rodamientos	2

Fuente. Autor

El modulo motor bomba, consta de cuatro partes fundamentales que son: la bomba, las líneas de bombeo, reservorio y elementos de control, se trata de un circuito cerrado de bombeo el cual genera carga mecánica al motor acoplado directamente a la bomba, mediante los elementos de control se puede generar mayor cantidad de carga al motor, dicha carga nos sirve para observar el comportamiento de los espectros tanto de vibraciones mecánicas así como el comportamiento del espectro de corriente de alimentación al estator.

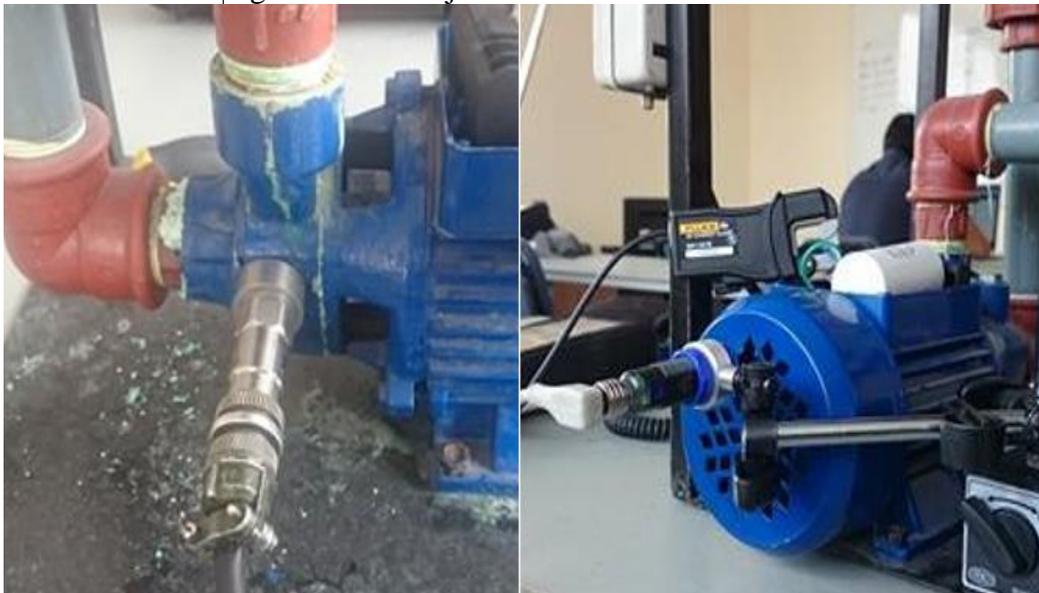
3.5.2.1 *Instalación eléctrica en motobomba con excentricidad estática.* Al tratarse de un motor monofásico se realizó una instalación directa, sin tomar en consideración la polaridad de la línea puesto a que es una consideración sin importancia y que no genera trascendencia.

El detalle que se debe tomar en cuenta es la identificación de la línea de una de las tres fases a la hora de ubicar la pinza amperimétrica, notando la dirección de flujo de la corriente de entrada al estator de la máquina de inducción.

3.5.2.2 *Puntos de medición en motobomba con excentricidad estática.* Tal como en el análisis que se practicara en el módulo con presencia de barras rotas, en el simulador de falla de excentricidad estática se debe definir los puntos adecuados para la toma de datos y medida de las variables, a diferencia del motor trifásico este motor-bomba presenta de manera normal puntos convenientes para ubicar los tres tipos de sensores que se van a emplear, el acelerómetro, pinza amperimétrica y fototacómetro.

La posición del acelerómetro se lo realiza de forma radial horizontal en la parte de la voluta de bombeo.

Figura 37. Montaje de sensores en motobomba



Fuente. Autor

3.5.2.3 *Base para montaje de modulo con excentricidad estática.* La parte fundamental del módulo es la base o chasis en donde se montan todos los elementos constitutivos del módulo simulador, en dicha se acoplaran la motobomba accesorios y el recipiente que contendrá el fluido antes mencionado.

Se trata de una base tipo columna de cuatro tirantes verticales que forma una figura cubica rectangular, en la base inferior se dispondrá la bomba, y en la base superior se ubicará el tanque reservorio anclado a la base superficial superior mediante una pega especial o tornillos que sujeten el tanque en su lugar, ambos elementos unido por la líneas de carga y descarga, en las cuales se instalaran las válvulas de esfera que regulan la carga y el indicador de presión mas adecuado.

Figura 38. Base para módulo simulador de excentricidad estática



Fuente. Autor

Tabla 16. Medidas de base para módulo con motobomba

Detalle	Medida [m]
Altura	0,56
Ancho	0,30
Largo	0,31

Fuente. Autor

3.5.2.4 Montaje de elementos en módulo con excentricidad estática.

- **Montaje de motobomba.** La bomba se ubicara en la parte inferior de la base que se muestra en la figura 39 se va a sujetar mediante 4 pernos M6 x 15, con una sujeción por medio de tuercas del mismo paso, se orientara la bomba a un costado de la base inferior con la tapa del ventilador ubicada ligeramente fuera del área de la base inferior.
- **Montaje de recipiente reservorio.** El recipiente que en adelante nos servirá como tanque contenedor del fluido a mover se ubicara en la base superior de la estructura construida, se ancla a la base por medio de la brida de succión del fluido, se debió realizar una perforación de aproximadamente 1 1/2 pulgada, por este agujero pasara la línea de succión en el circuito de bombeo, y se situó más o menos alineada con la boca de succión de la bomba, a fin de garantizar un ensamble final satisfactorio

y ergonómicamente conveniente para los ensayos que se van a realizar de aquí en adelante.

- **Ensamble final de los elementos.** El paso final para conseguir el modulo terminado y ensamblado, es unir las dos partes antes mencionadas por medio de los accesorios, armando de forma adecuada los elementos de succión y descarga con sus respectivos dispositivos de control y medida de variables.

Figura 39. Motor bomba para ensayo de excentricidad estática



Fuente. Autor

CAPÍTULO IV

4. MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE VARIABLES

El presente capítulo describirá el procedimiento de toma o medida de variables requeridos para la consecución del presente proyecto, puntualizando los tiempos de medidas, duración de cada ensayo y las condiciones de monitoreo al motor a plena carga.

4.1 Metodología para pruebas

Para el procedimiento de medida de variables en el motor con barras rotas, se deben realizar determinadas calibraciones de montaje suministro de voltajes, control de corriente de entrada y regulación de potencia entrante a los motores, además del proceso de montaje mecánico, tensado de correa de transmisión, medida de desplazamientos y ubicación de sensores.

Todo estas condiciones se pueden conseguir siguiendo un proceso de pasos lógicos los cuales se detallaran en el presente apartado, con la finalidad de garantizar una operación y diagnóstico técnico de forma acertada, y bajo condiciones funcionales establecidas dentro de los rangos óptimos permisibles otorgados por los fabricantes o cumpliendo las características impresas en la placas de los motores de rotor de jaula.

4.1.1 *Calibración de la potencia de entrada.* Esta configuración es el punto de partida del ensayo, el motor trifásico debe trabajar a una potencia entrante de aproximadamente 410W, esta magnitud la podemos obtener bajo tres métodos que son: la medida de la corriente entrante, la utilización de un vatímetro convencional o la utilización del equipo FLUKE 435 II disponible en el laboratorio, a continuación se describen los pasos que se deben realizar:

- Sujetar el módulo simulador de fallas a la mesa ranurada
- Aflojar el perno de ajuste de la base del templador situado en la parte más baja entre el motor y el alternador con la ayuda de una llave de tipo allen y el perno de ajuste de la oreja giratoria del alternador.

- Ubicar la correa de transmisión dando un leve ajuste previo.
- Conectamos el cordón eléctrico del motor a la red trifásica disponible
- Conectamos el alternador a la fuente de 12V disponible en la unidad de vibraciones mecánicas para la excitación inicial de la bobina, siguiendo el esquema de la figura 36.
- Instalamos el equipo FLUKE 435 II en los conductores o puntos de medición del motor.
- Si no vamos a utilizar el equipo FLUKE 435 II, únicamente ubicamos una pinza amperimétrica en una de las líneas.
- Arrancamos el motor mediante el selector del tablero, ubicándolo en la posición ON.
- Encendemos la carga o consumidor del alternador (foco), por medio del interruptor situado en la parte posterior del alternador.
- Con el motor en marcha procedemos con el tensado de la correa, la tensión se la realiza de forma mecánica ajustando las tuercas de sujeción del templador.
- Se debe tensar la correa hasta obtener una lectura de 410W en el caso de utilizar el equipo FLUKE 435 II, o una intensidad aproximada de 2A, si estamos utilizando una pinza amperimétrica convencional.
- Una vez que observamos estos valores en la pantalla del equipo de medición seleccionado, procedemos con el ajuste final de las tuercas de recorrido y los pernos que ajustan la base del templador y la oreja giratoria del alternador.

4.1.2 *Mediciones en motores.*

4.1.2.1 *Mediciones sin falla.* Este procedimiento se lo va a realizar en el motor de inducción trifásico, previo al daño progresivo que se va a practicar en las barras del rotor,

cabe mencionar que este ensayo se lo puede realizar una sola vez al tratarse de un ensayo del tipo destructivo, para conseguir el propósito debemos seguir los siguientes pasos:

- Realizar la calibración de potencia descrita anteriormente, y apagar el sistema.
- Se ubica un acelerómetro en cualquiera de las cuatro bases en forma de disco, dispuestas en el motor, para esta prueba lo haremos en la base de orientación vertical del lado acoplado (radial vertical).
- Fijamos la base auxiliar de acero a la mesa ranurada.
- Colocamos el soporte magnético del fototacómetro sobre la base auxiliar, seleccionamos ON, para que quede fija.
- Montamos el fototacómetro en el anillo de sujeción y damos un ajuste manual con los anillos roscados, fijando el lente en forma paralela al eje del motor.
- Conectamos los terminales de los sensores al equipo Vibracheck, el terminal del acelerómetro en la entrada CANAL 1, y el terminal del fototacómetro en la entrada MULTIPIN.
- Ubicamos la pinza amperimétrica FLUKE i5S en una de las líneas o conductores de entrada, expuestos en la tapa de conexiones del motor, fijándonos sentido de la corriente.
- Conectamos terminal macho BNC de la pinza amperimétrica al terminal hembra BNC del cable adaptador disponible.
- El otro extremo del cable adaptador tiene un terminal AMPENOL, compatible con las entradas del equipo vibracheck, siendo así, conectamos este terminal a la entrada CANAL 2
- Comunicamos el equipo vibracheck AVG 200 a un ordenador que tenga instalado el software del equipo Idear, mediante el cable de datos USB con la opción registro y en este menú elegir opción Viewer.

- Encendemos el sistema, y procedemos con las medidas requeridas.

4.1.2.2 *Mediciones con falla.* En un motor con barras rotas la falla que se va a provocar al motor es de tipo irreversible, por lo que se debe llevar a cabo el procedimiento descriptivo a continuación:

- Disponer del motor desmontado totalmente
- Retiramos la tapa posterior del motor, el ventilador y la polea del motor.
- Aflojamos y retiramos los pernos que sujetan las tapas del motor.
- Desmontamos las tapas y retiramos el rotor.
- Señalamos en un punto céntrico de una barra, a cualquier longitud paralela del eje.
- Montamos y fijamos el rotor al tornillo de sujeción de un taladro o fresadora.
- Realizamos un agujero, a fin de seccionar una de las barras del rotor.
- Desmontamos de la máquina de mecanizado.
- Montamos el rotor al estator del motor, además de ubicar las tapas del motor.
- Ajustamos los pernos sujetadores de las tapas del motor.
- Montamos la polea, ventilador y la tapa posterior del motor.
- Ubicamos el motor en las barras paralelas base, dispuestas en la placa o chasis del módulo simulador de fallas y ajustamos adecuadamente los pernos de anclaje.
- Colocamos la correa de transmisión, y damos ajuste leve.
- Calibramos la potencia del motor a estudiar, tomando en cuenta las características y eficiencia del motor siguiendo el proceso ya establecido.

- Realizamos la toma de medidas, siguiendo el mismo proceso de la medición sin fallas.

Para el conjunto motor bomba Este proceso se llevó a cabo por la necesidad de la utilización del módulo de bombeo estacionario disponible en el laboratorio de diagnóstico técnico, a fin de identificar el armónico característico de falla correspondiente a la excentricidad estática, para lo cual se describe el proceso detalladamente.

- Disponer de la bomba en estado de reposo y retirar la tapa de los circuitos.
- Ubicamos la pinza amperimétrica FLUKE i5s, en la línea de entrada expuesta en la tapa de circuitos (cable azul).
- Conectar el acelerómetro a la entrada canal 1 del equipo analizador de vibraciones.
- Conectar el fototacómetro a la entrada multipin del equipo analizador de vibraciones.
- Conectar el equipo analizador a la computadora por medio del cable USB.
- Encender el equipo analizador
- En el equipo analizador, configurar siguiendo los siguientes pasos: registro, maintrack viewer, y se comunica automáticamente con el ordenador.
- Enfocar el fototacómetro a través de la rejilla de la tapa, comprobando que se encienda el foco led del sensor, previamente conectado al equipo Idear en estado encendido.
- Ubicar el acelerómetro en posición radial en el eje de las ordenadas (vertical).
- Conectar el cable de alimentación a un tomacorriente de voltaje nominal de 120V.
- Abrir la configuración en el software con las mismas configuraciones del ensayo anterior.

- Se arranca la bomba con la válvula completamente abierta, esto dará una presión de bombeo de 0,00 psi, que significa la más baja carga para el motor.
- Luego de realizar una grabación de aproximadamente 30 segundos, cerramos un poco la válvula subiendo la presión de bombeo a 5,00 psi y nuevamente medimos y grabamos.
- Este procedimiento lo realizamos hasta lograr una presión de 45,00 psi.
- La última medida sobre los 45,00 psi, es de 48,00 psi, que es la máxima presión posible que se puede experimentar, en este punto el caudal es nulo.

4.1.3 *Configuración de software.* Para lograr obtener las medidas adecuadas es necesario configurar el software del equipo analizador Vibraheck 200, describiendo los puntos de tomas de datos, tipos de sensores usados con su respectiva sensibilidad y las curvas o lecturas necesarias.

- Abrimos programa MAINTraQ Viewer, proporcionado por el equipo analizador.
- Seleccionamos la opción de nuevo proyecto o análisis.
- Seleccionamos la pestaña apoyo, creamos nuevo, elegimos rodamiento especificando código y marca.
- Seleccionamos la pestaña puntos, es decir será el lugar en donde se vaya a ubicar el acelerómetro y la pinza amperimétrica.
- Denominamos los puntos de forma conveniente e identificable, usaremos el punto vertical del lado acoplado y la pinza amperimétrica.
- Escribimos las características de los sensores y también el canal de la entrada física correspondiente a cada sensor
- En la pestaña de Triggers, creamos un nuevo, e introducimos las características del fototacómetro, describiendo también la entrada física en el equipo.

- En la pestaña formas de onda, elegimos las que se requieran, estas son:

Tabla 17. Rangos de frecuencias para análisis con equipo Vibrachek

Magnitud	Rango de frecuencias
Aceleración	5,0 – 10.000,0 Hz
Velocidad	10,0 – 1.000,0 Hz
Desplazamiento	10,0 – 200,0 Hz
Envolvente	5.000,0 – 10.000,0 Hz
Corriente	5,0 – 120,0 Hz

Fuente. Autor

- Finalmente configuramos las variables deseadas que son:

Tabla 18. Variables que se deben obtener mediante el análisis

Magnitud	Variable
Aceleración	Rms
Velocidad	Rms
Envolvente	Rms
Desplazamiento	Pico a Pico
Corriente	Rms
Revoluciones	RPM

Fuente. Autor

4.2 Análisis en motor con barras rotas

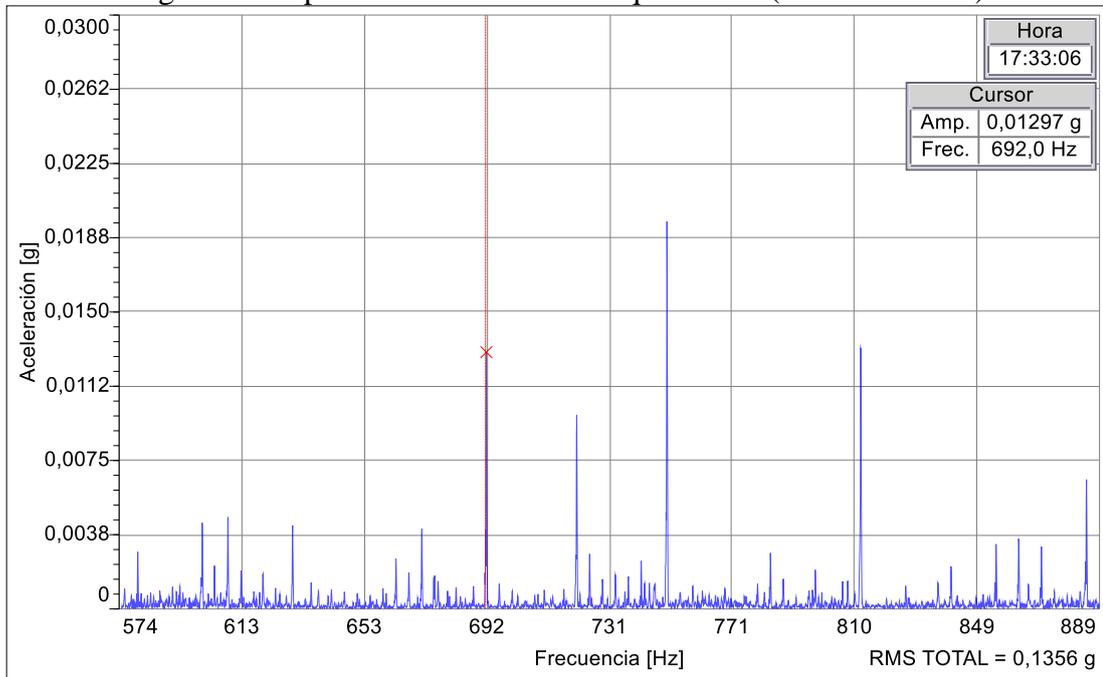
De una correcta toma de datos depende la interpretación clara y eficaz a la hora de emitir los informes de diagnóstico técnico, por lo cual se procede a la recolección de datos de las variables que se pueden analizar, siguiendo los pasos anteriormente establecidos a fin de alcanzar los resultados y objetivos esperados.

La toma de datos se realizó bajo un régimen de trabajo del 80% de carga del motor a 1740 RPM.

4.2.1 *Espectro de vibraciones mecánicas en máquina sana.* Se realizó el análisis de la amplitud a frecuencia característica de fallo en el daño de barras que presentan anomalías tales como fisuras o rupturas, la frecuencia característica de este tipo de modo

de falla se manifiesta a altas frecuencias sobre el orden de los 600 Hz, se estudia entonces el espectro de aceleración resultante, obtenido mediante la ecuación (4).

Figura 40. Espectro de aceleración maquina sana (sin barras rotas)



Fuente. Autor

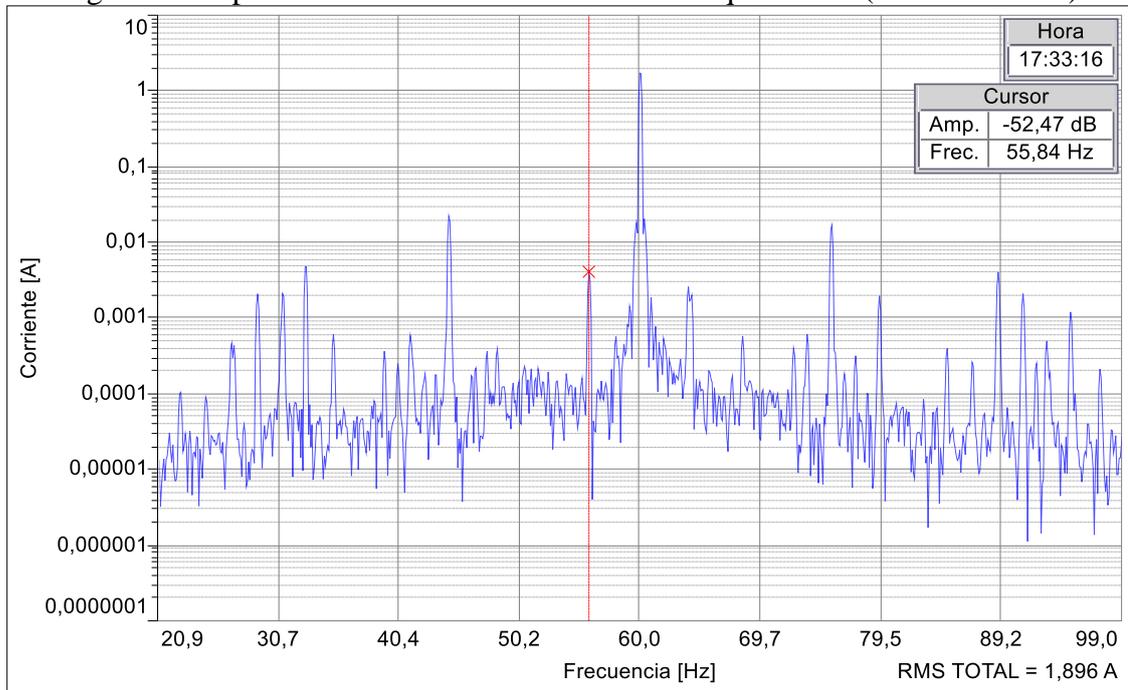
Como se puede ver en el espectro de aceleración correspondiente a una maquina sana se puede identificar la amplitud a la frecuencia característica de barras rotas, que genera las vibraciones mecánicas en condiciones normales bajo los escenarios de carga y velocidad constante, en la figura 40 se observa la frecuencia característica de análisis, ésta frecuencia debe marcar un incremento de su valor de amplitud en función al daño que le vayamos practicando a las barras del motor.

Las condiciones normales de buen funcionamiento se deben identificar, armónicos naturales presentes en los distintos elementos constitutivos de la máquina de inducción trifásica, a fin de establecer valores de amplitud correspondientes a valores establecidos que describan condiciones de buen estado y funcionamiento.

4.2.2 *Espectro de la corriente del estator en maquina sana.* La intención fundamental del presente proyecto es la de realizar una comparación entre dos modelos de diagnóstico técnico, vibraciones mecánicas y análisis de la corriente, se procede con el análisis de la corriente del estator de la maquina sana, identificando las frecuencias

características de daño que son de: 55,56 Hz y 64,44 Hz, bajo y sobre la frecuencia de la red de alimentación 1X mediante la ecuación (6).

Figura 41. Espectro de intensidad del estator en maquina sana (sin barras rotas)

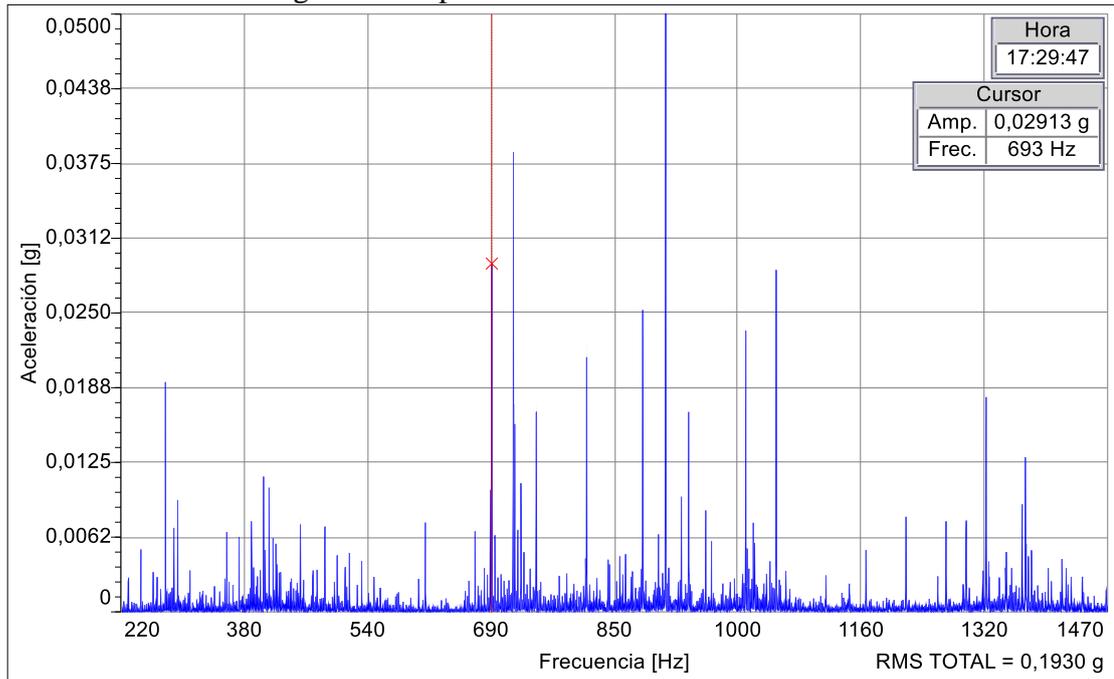


Fuente. Autor

En la figura 41 se observa de forma clara el armónico fundamental 1X, correspondiente al armónico de frecuencia de línea, el cursor marca el armónico característico de fallos por barras rotas, resultando curioso la visualización de un pico significativo, esto debido a que de forma natural en el funcionamiento de un motor existen pulsaciones naturales generadas por el desbalanceo magnético propio de la máquina. Esencialmente un motor no debería presentar ningún armónico desconocido a parte de los que se generan por las frecuencias características de los elementos constitutivos, cabe señalar que por factores de diseño y construcción cada motor presenta cierto nivel de daño inherente por llamarlo así en términos comprensibles.

4.2.3 *Espectro de vibraciones mecánicas con barras rotas.* De acuerdo al cálculo de la frecuencia característica que presentan las barras rotas en un motor de inducción, al estar ubicada a alta frecuencia por sobre el orden de los 600Hz, se procedió con el análisis del espectro de aceleración, con régimen de carga previamente establecida, esta grafica se obtiene con un nivel de daño provocado correspondiente a la ruptura completa de una de las barras de cortocircuito del rotor.

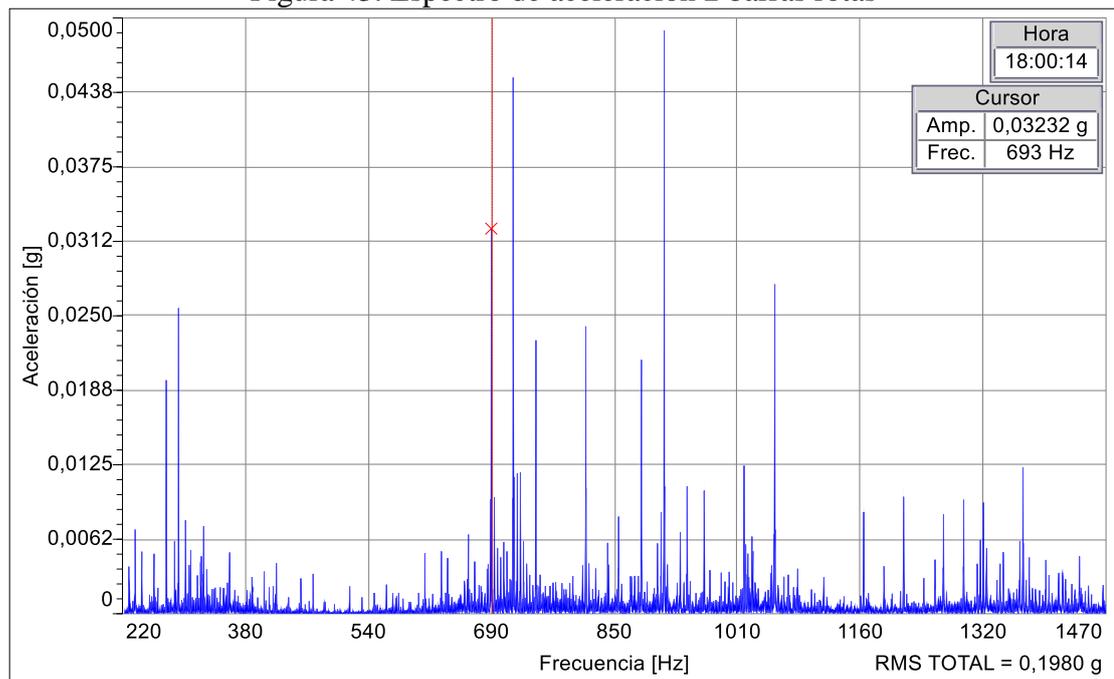
Figura 42. Espectro de aceleración 1 barra rota



Fuente. Autor

Cuando se obtiene una barra completamente rota la amplitud se ha incrementado al doble de la amplitud original o de motor sano, existe la posibilidad de que cuando se practiquen daños adicionales el incremento de la amplitud en dicha frecuencia sea proporcional a razón de 1.

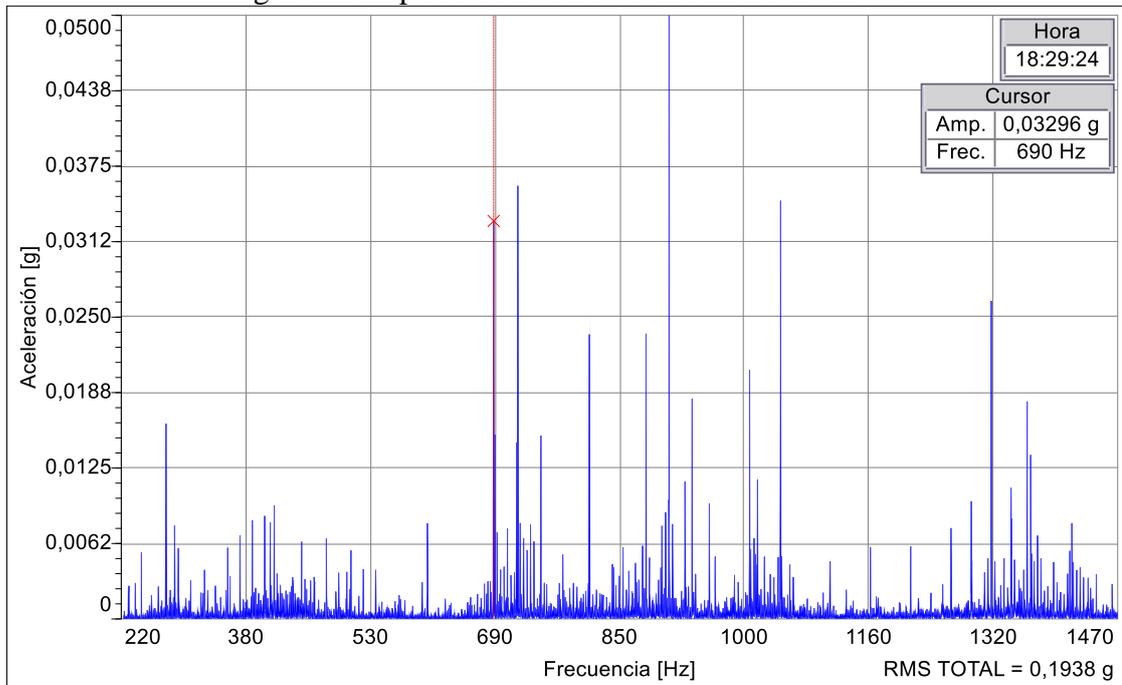
Figura 43. Espectro de aceleración 2 barras rotas



Fuente. Autor

A medida que la falla se incrementa con la ruptura de una segunda barra la asimetría en el motor genera mayores pulsaciones y desequilibrios magnéticos, se evidencia entonces que en la frecuencia característica de barras rotas, existe un crecimiento en el valor de la amplitud.

Figura 44. Espectro de aceleración con 3 barras rotas



Fuente. Autor

El aumento de la amplitud con una tercera barra rota se ha detenido, resultando curioso que el incremento o severidad del modo de falla no podría ser evidenciado a partir de este punto por lo cual se llega a la conclusión de que la máxima amplitud de daño se quedaría ubicada a esta magnitud, ésta podría ser un dato para tomar acciones de mantenimiento o de diagnóstico técnico, resultando la máxima severidad detectable en este tipo de motor.

Tabla 19. Medidas de amplitudes con profundidad progresiva en análisis vibracional

Frecuencia característica [Hz]	Profundidad [mm]	Amplitud [g]	Condición
692	0	0,012	M. sana
693	2	0,015	Daño progresivo
694	4	0,019	Daño progresivo
693	6	0,020	Daño progresivo
692	8	0,021	Daño progresivo
693	10	0,028	Daño progresivo
693	12	0,029	1 barra rota

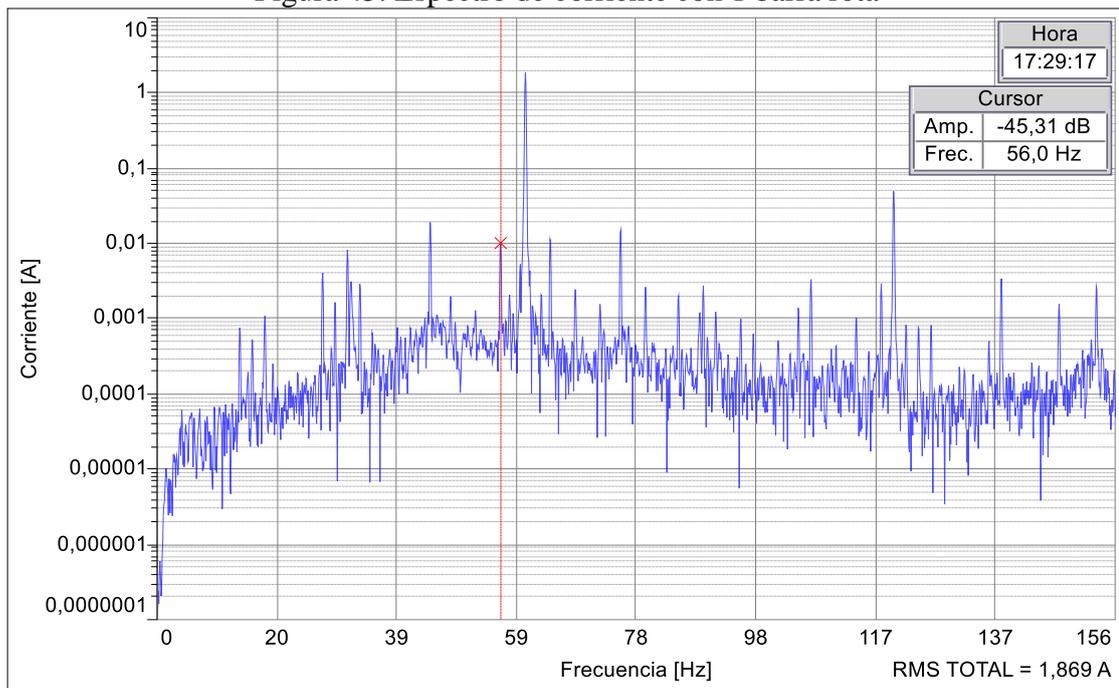
Tabla 19. (Continuación)

693	12	0,032	2 barras rotas
690	12	0,032	3 barras rotas
692	0	0,044	3 pernos prisioneros

Fuente. Autor

4.2.4 *Espectro de la corriente del estator con barras rotas.* El espectro de corriente con la presencia de una barra rota genera un espectro estable y similar al espectro generado en una maquina sana, las diferencias se verán reflejadas tras realizar el análisis del incremento en valores de amplitudes correspondientes a las frecuencias características de falla, a medida que se vaya practicando los daños progresivos hasta alcanzar la ruptura total de una barra y posteriormente de dos barras más elegidas de forma aleatoria, hasta obtener tres barras seccionadas.

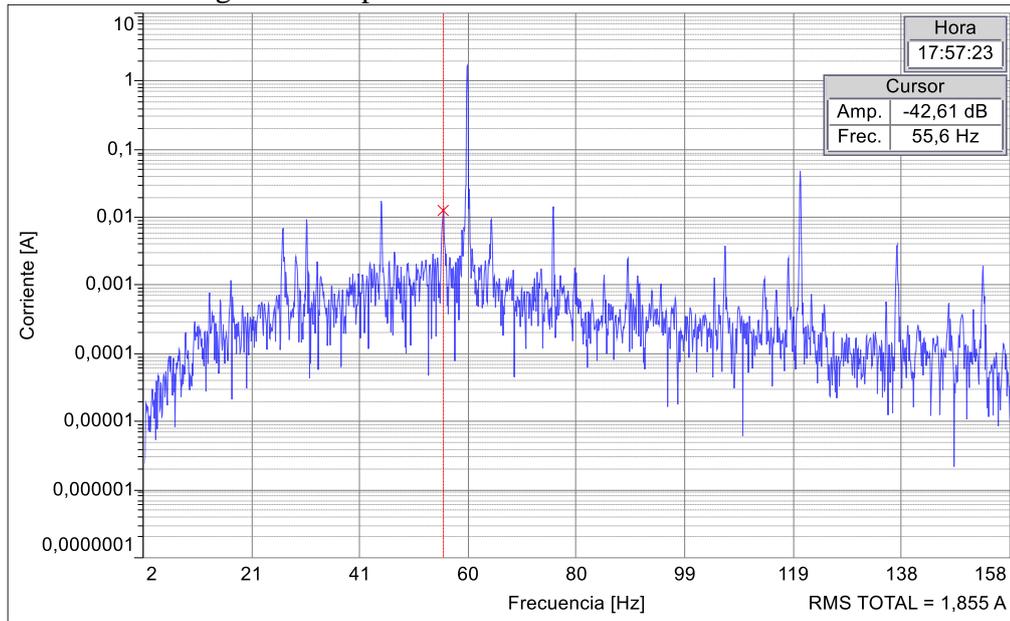
Figura 45. Espectro de corriente con 1 barra rota



Fuente. Autor

Cuando se ha alcanzado romper una barra completamente se experimenta una variación de amplitud a la frecuencia característica de falla, como muestra la figura 45 por lo cual se evidencia que el proceso de análisis ha sido acertado, la frecuencia fundamental que es igual a la frecuencia de red es decir a 60 Hz, se mantienen constante en su valor de amplitud, quiere decir que este modo de falla no afecta o tiene acción sobre la frecuencia de suministro de la red trifásica en ninguna de las fases.

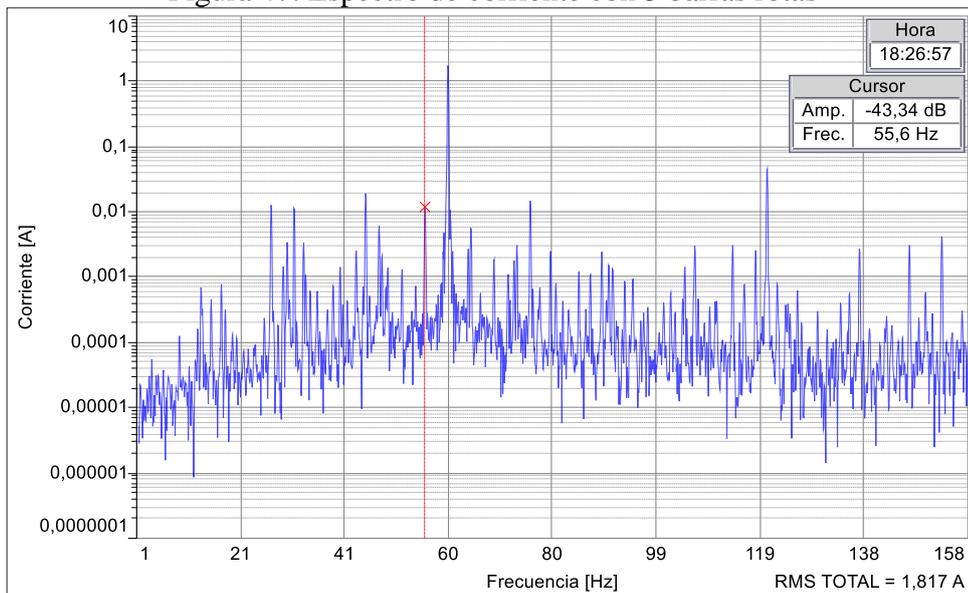
Figura 46. Espectro de corriente con 2 barras rotas



Fuente. Autor

A medida que el daño se ha incrementado, es decir se ha seccionado una segunda barra conductora del rotor de jaula, por acción del mecanizado se observa una variación en la amplitud a la frecuencia característica de falla en el espectro de corriente. De la misma manera que cuando se estudió el espectro de corriente correspondiente al análisis de una sola barra rota, la amplitud de la frecuencia fundamental de la red a 60 Hz, se mantiene estable sin sufrir efectos parásitos por las asimetrías presentes en el rotor del motor estudiado.

Figura 47. Espectro de corriente con 3 barras rotas



Fuente. Autor

Finalmente cuando se ha logrado cortar o romper el circuito completamente de 3 barras de las 28 presentes en el rotor, se observó que la amplitud a la frecuencia característica de falla en el espectro de corriente, casi ya no sufre una variación considerable, si bien se observa variación ésta podría variar aumentando o disminuyendo en función al tiempo de grabación del ensayo, de tal manera se puede llegar a la conclusión que el método de análisis espectral de corriente de alimentación del estator, posee una efectividad media, viéndose limitado en un punto determinado, con la característica en común de que la amplitud a la frecuencia característica de red se ha mantenido constante.

Tabla 20. Medidas de amplitudes con profundidad progresiva en análisis espectral de la corriente en motor con barras rotas

Frecuencia característica [Hz]	Profundidad [mm]	Amplitud [dB]	Condición
55,9	0	-52,70	M. sana
56,1	2	-52,12	Daño progresivo
56,3	4	-52,20	Daño progresivo
56,0	6	-52,78	Daño progresivo
56,1	8	-50,29	Daño progresivo
56,0	10	-46,85	Daño progresivo
56,0	12	-45,31	1 barra rota
55,9	12	-43,21	2 barras rotas
55,7	12	-42,85	3 barras rotas
56,0	0	-45,28	3 pernos prisioneros

Fuente. Autor

4.3 Análisis de motor bomba con excentricidad estática permanente

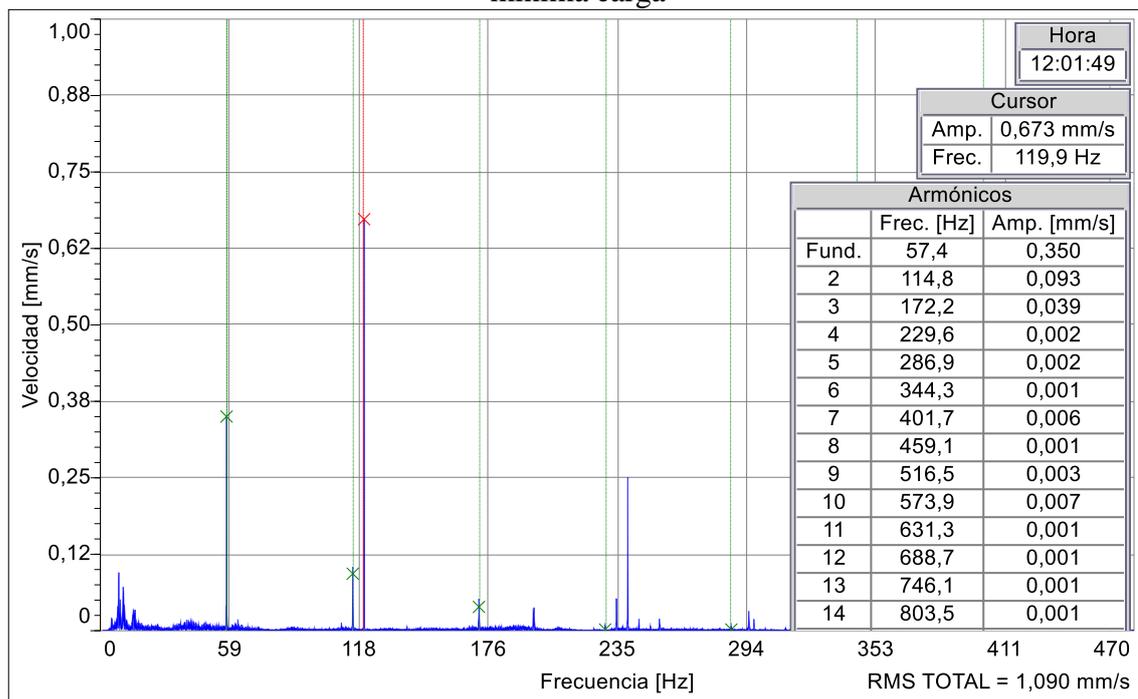
Con la finalidad de identificar los armónicos característicos de falla, en el dominio de la frecuencia correspondiente a la excentricidad estática, se aplica los dos modelos de diagnóstico técnico, el análisis de vibraciones mecánicas y el análisis espectral de la corriente de alimentación del estator, por lo antes explicado se realizó la experimentación en el módulo simulador de falla de circuito cerrado de bombeo, que está constituido por el motor monofásico de rotor de jaula.

Dicho motor monofásico, experimenta de forma normal una excentricidad estática permanente, éste motor no posee tapas desplazables a fin de generar mayor o menor excentricidad estática, se analizará el armónico característico de falla en diferentes

escenarios de carga, la cual se puede variar estrangulando el caudal de fluido que debe mover la bomba en el circuito cerrado de bombeo aumentando la presión de línea de descarga y por consiguiente la carga a la voluta de la bomba y al motor.

4.3.1 *Espectro de vibraciones mecánicas en motor de bomba con excentricidad estática permanente.*

Figura 48. Espectro de velocidad en motor con excentricidad estática permanente a mínima carga



Fuente. Autor

En el análisis practicado a la motobomba, sabiendo que dicha maquina presenta excentricidad estática de forma permanente se identificó de forma clara la presencia del armónico característico de la excentricidad estática ubicado a 120Hz, éste es el armónico de segundo orden respecto al fundamental de la red de alimentación.

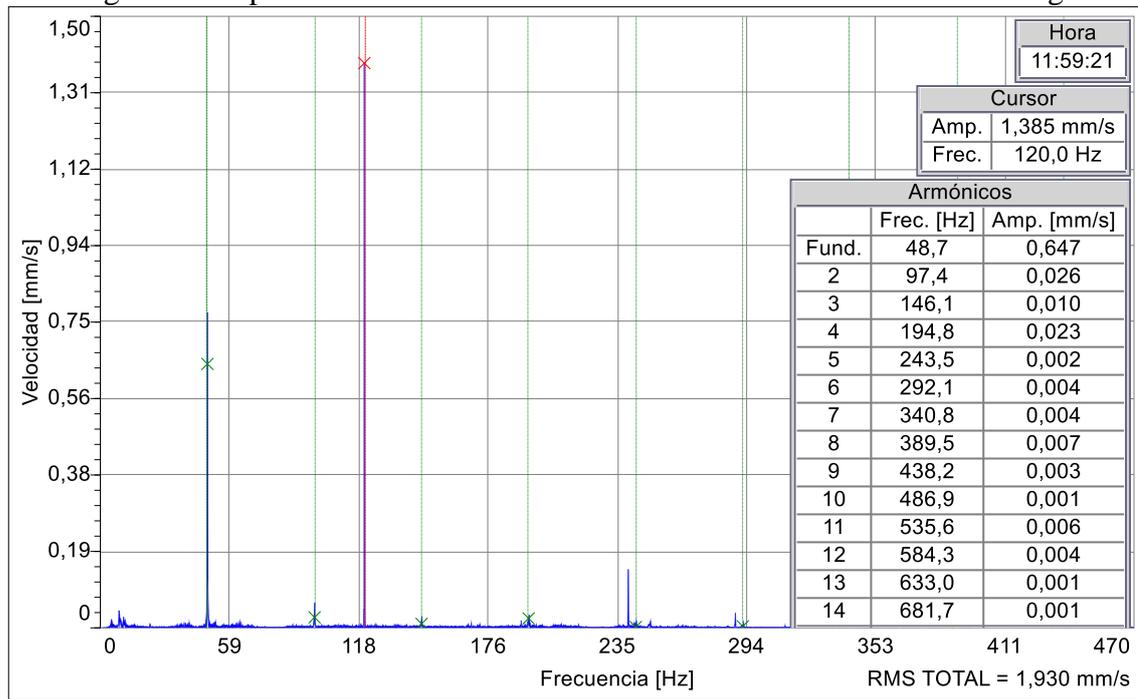
Para garantizar que dicho armónico corresponde a la excentricidad estática la experimentación se realiza de aquí en adelante aumentando la carga al motor, subiendo gradualmente la presión de la línea de bombeo, mediante una válvula de esfera ubicada en la línea de descarga de la bomba se estranguló el caudal del fluido en movimiento, esto genera una reducción de velocidad de giro del eje del motor, variando el armónico fundamental de giro en el espectro de velocidad correspondientemente al análisis de

vibraciones, a fin de observar el comportamiento del armónico a la frecuencia característica de falla.

El armónico fundamental de giro, se encuentra situado a 57,4 Hz que corresponde a una velocidad de giro de 3440 revoluciones por minuto.

4.3.1.1 Espectro de velocidad de la vibración en bomba con máxima carga.

Figura 49. Espectro de velocidad de la vibración en bomba con máxima carga



Fuente. Autor

La máxima carga que se le pudo dar a la bomba, corresponde al alza de la presión por medio de la válvula ubicada en la línea de descarga, 48 psi son la presión máxima posible experimentada llegando al cierre total de caudal.

Se observó en el espectro de la velocidad una variación muy marcada de la frecuencia del armónico fundamental de giro y de manera correspondiente la variación de la frecuencia de los armónicos mayor orden.

De forma esperada se observó que el pico fundamental correspondiente a la falla de excentricidad estática no ha variado en función a la elevación de la carga demostrando que la excentricidad si presenta el armónico identificado a 120Hz, la variación que existe

a esta frecuencia es la amplitud, debido al esfuerzo que realiza el motor al aumentar la carga pero sin experimentar cambios a nivel de la frecuencia característica.

Tabla 21. Frecuencias de armónicos de velocidad en bomba con excentricidad permanente

Presión [psi]	Frecuencia de armónicos [Hz]				
	c. fallo	1X	2X	3X	4X
00	119,9	57,4	114,8	172,2	229,6
05	120,0	57,5	115,0	172,5	229,9
10	119,9	57,2	114,4	171,6	228,7
15	120,0	56,8	113,6	170,4	227,3
20	120,1	56,3	112,6	168,9	225,1
25	120,0	56,0	111,0	167,0	223,0
30	120,0	55,0	110,0	165,0	220,0
35	119,9	53,8	107,6	161,4	215,3
40	120,0	53,0	105,0	158,0	211,0
45	119,9	50,6	101,1	151,7	202,3
48	120,0	48,7	97,4	146,1	194,8

Fuente. Autor

A medida que la carga aumenta se observó una variación gradual en el armónico de frecuencia fundamental de giro y de orden superior, el armónico correspondiente a excentricidad estática no ha variado en función a la carga demostrando que se trata del armónico típico de la falla mencionada.

Tabla 22. Amplitudes de armónicos de velocidad en bomba con excentricidad permanente

Presión [psi]	Amplitud de armónicos [mm/s]					RMS [mm/s]
	c. fallo	1X	2X	3X	4X	
00	0,673	0,350	0,093	0,039	0,002	1,090
05	0,684	0,527	0,027	0,005	0,000	1,193
10	0,675	0,436	0,069	0,023	0,020	1,063
15	0,741	0,389	0,085	0,017	0,015	1,076
20	0,787	0,395	0,082	0,005	0,030	1,110
25	0,717	0,345	0,082	0,002	0,011	1,143
30	0,924	0,383	0,095	0,010	0,027	1,258
35	1,092	0,478	0,066	0,013	0,022	1,398
40	1,202	0,656	0,080	0,010	0,050	1,578
45	1,300	0,930	0,052	0,010	0,011	1,886
48	1,385	0,647	0,026	0,010	0,023	1,930

Fuente. Autor

A diferencia de la variación frecuencial analizada en el espectro de velocidad, las amplitudes si varían en todos los armónicos, incluido el armónico correspondiente a la

frecuencia característica de la excentricidad estática. Esto quiere decir que la falla aumenta o se torna más agresiva cuando se aumenta la carga al motor, esto llevaría a una destrucción de otros elementos mecánicos como los rodamientos.

4.3.2 *Espectro de la corriente de alimentación en motor con excentricidad permanente.* La corriente de alimentación al estator del motor aporta con los armónicos fundamental y de orden superior, además del valor de frecuencia característica de falla correspondiente a la excentricidad estática, para el caso del análisis del espectro de la corriente, varía en función de la carga que se aplique al motor, tomando en consideración el aumento del deslizamiento por el incremento de la carga, y la variación de la frecuencia fundamental de giro.

Por consiguiente el armónico característico de falla debe moverse en el dominio de la frecuencia gradualmente y a medida de la carga que se le vaya aplicando.

Los valores mostrados en la tabla 23, son las frecuencias calculadas en función a la variación del deslizamiento mediante la ecuación (7), por lo cual el armónico representativo de este modo de falla debe variar en el dominio de la frecuencia en los espectros de análisis de la corriente.

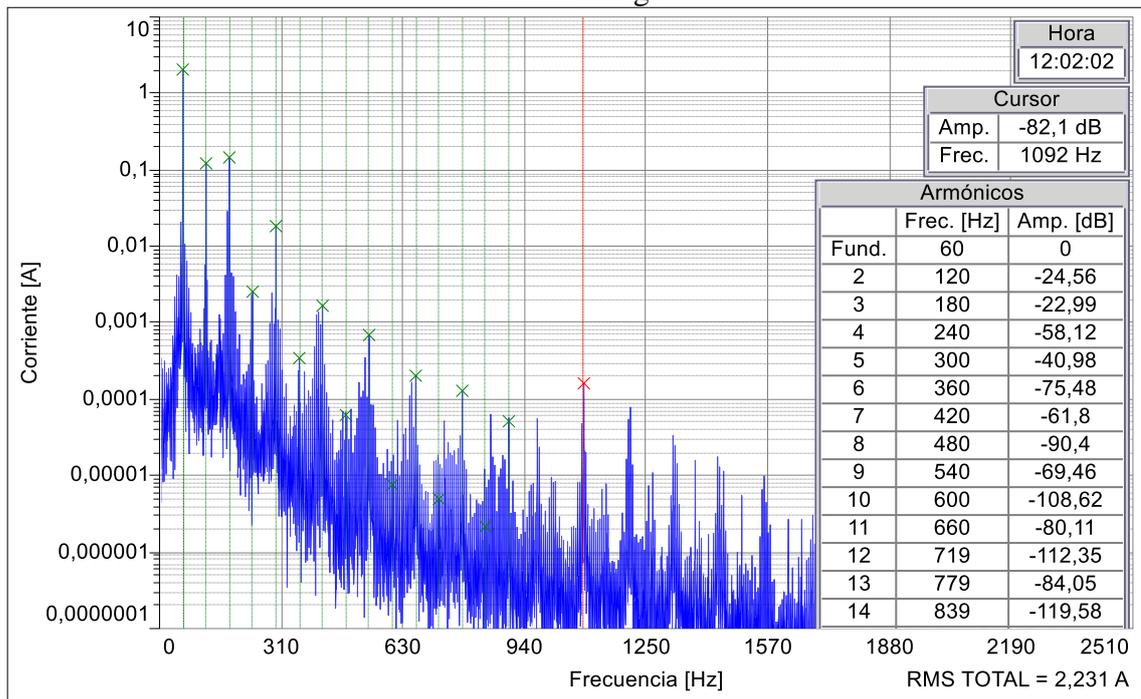
El valor de deslizamiento aumenta en función a la carga aplicada a la bomba, al ser dato de cálculo dentro de la ecuación mencionada, esto generara una variación decreciente en el dominio frecuencial correspondiente al análisis de la corriente.

Tabla 23 Frecuencias calculadas características de excentricidad estática

Presión [psi]	RPM	s	f. fallo [Hz]
0	3444	0,042	1092,12
5	3450	0,041	1093,26
10	3432	0,046	1087,56
15	3408	0,050	1083,00
20	3378	0,060	1071,60
25	3360	0,066	1064,76
30	3294	0,080	1048,80
35	3228	0,100	1026,00
40	3180	0,116	1007,76
45	3036	0,150	969,00
48	2922	0,180	934,80

Fuente. Autor

Figura 50. Espectro de corriente en motor con excentricidad estática permanente mínima carga



Fuente. Autor

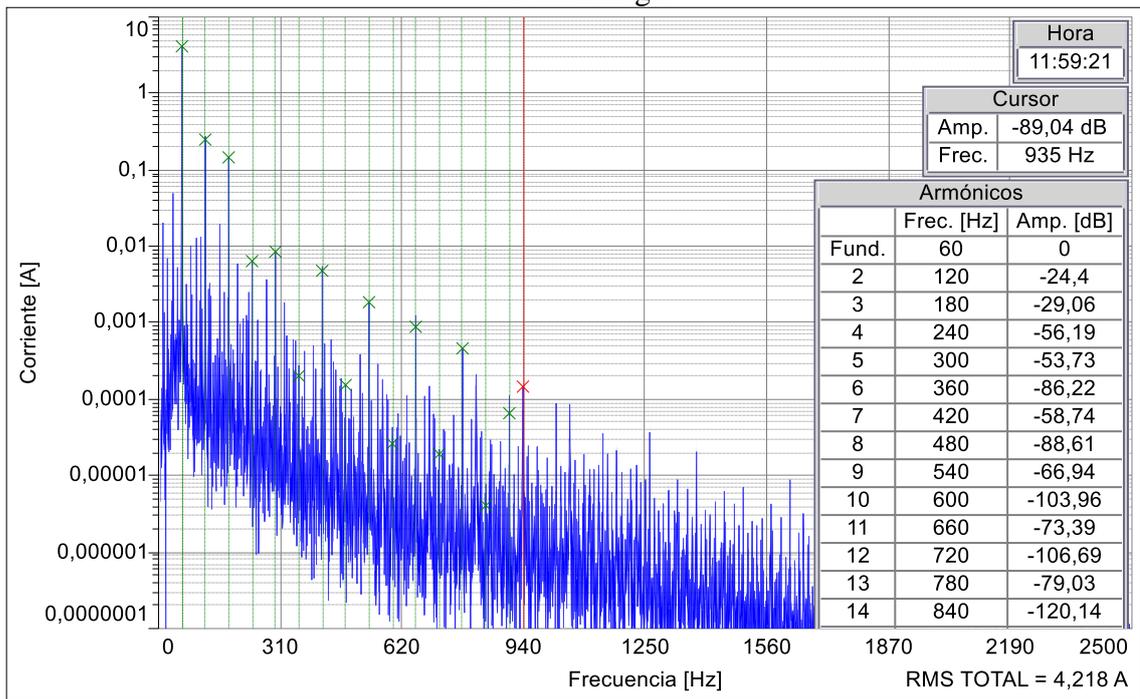
Se observó en el espectro de la corriente del estator, con el régimen de carga mínimo, es decir con la presión de la bomba a 0 psi, de forma clara el armónico característico correspondiente a la falla por excentricidad estática con su respectiva amplitud.

El resultado experimental de aquí en adelante debe coincidir con las frecuencias de falla calculadas presentadas en la tabla 23, a fin de garantizar que dicho armónico en cada una de las frecuencias calculadas corresponden a excentricidad estática.

4.3.2.1 *Espectro de la corriente de alimentación en motor con excentricidad permanente a máxima carga.* Esta prueba se realizó sometiendo al motor a la máxima carga posible, se lleva a obtener dicha carga mediante la válvula estranguladora de caudal ubicada en la línea de descarga de la bomba, dicha carga se da al cerrar la válvula hasta que el manómetro indicador nos dé una lectura de 48 psi.

El rango de aumento de la carga es de 5 unidades empezando con una presión medida de 0 psi, hasta obtener una presión de 45 psi, el ultimo valor que no corresponde a esta variación constante se presenta cuando se cierra completamente el caudal generando una presión máxima de 48 psi, en este punto el caudal es nulo.

Figura 51. Espectro de la corriente del estator en motor con excentricidad estática a máxima carga



Fuente. Autor

En el espectro obtenido se observó que efectivamente el armónico característico de falla correspondiente a la excentricidad estática si se desplazó en el dominio de la frecuencia conservando la amplitud, dicha amplitud se mantiene por el hecho de que la falla presente es permanente y la severidad no se ve incrementada mayormente en función a la carga a la que se ha sometido el motor, mediante el análisis de la corriente de alimentación.

Se observó también que el armónico fundamental y los armónicos de orden superior no han variado ni en el dominio de la frecuencia y tampoco en la amplitud de cada uno de ellos, por lo cual se encuentra como resultado del ensayo la variación de la frecuencia característica de falla.

Tabla 24. Variación de frecuencia en el armónico de fallo en el espectro de corriente de motor con excentricidad estática permanente

Presión [psi]	Frecuencia de armónicos [Hz]				
	f. fallo	1X	2X	3X	4X
00	1092	60	120	180	240
05	1095	60	120	180	240
10	1089	60	120	180	240
15	1082	60	120	180	240
20	1073	60	120	180	240
25	1063	60	120	180	240

Tabla 24. (Continuación)

30	1047	60	120	180	240
35	1029	60	120	180	240
40	1008	60	120	180	240
45	970	60	120	180	240
48	935	60	120	180	240

Fuente. Autor

En la tabla 24 se puede observar el comportamiento de la frecuencia característica que genera la excentricidad estática, notando que coinciden con las frecuencias calculadas mostradas anteriormente que se presentan en la tabla 23.

Los armónicos fundamentales del espectro de la corriente de alimentación no se ven afectados de ninguna manera, estos armónicos corresponden a la frecuencia de red que es de 60Hz, y los armónicos de orden superior que son función del 1X.

Estos resultados garantizan que la frecuencia característica de fallo es función de la velocidad de giro y del deslizamiento por lo cual queda comprobado que el análisis espectral de la corriente, si nos permite identificar los armónicos de falla correspondientes a la excentricidad estática y que la ecuación presentada se ajusta a los resultados esperados.

Tabla 25. Variación de amplitud en los armónicos en el espectro de corriente de motor con excentricidad estática permanente

Presión [psi]	Amplitud de armónicos [dB]					RMS [A]
	c. fallo	1X	2X	3X	4X	
00	-82,10	0	-24,56	-22,99	-58,12	2,231
05	-83,87	0	-25,95	-23,15	-59,13	2,231
10	-82,86	0	-24,37	-23,11	-58,87	2,382
15	-83,98	0	-25,38	-23,22	-59,16	2,492
20	-85,47	0	-25,23	-24,89	-59,08	2,646
25	-86,35	0	-24,97	-24,96	-59,48	2,812
30	-86,88	0	-24,19	-25,19	-58,26	3,015
35	-87,94	0	-23,79	-26,09	-57,90	3,262
40	-91,43	0	-25,19	-27,63	-58,08	3,527
45	-88,22	0	-23,60	-28,34	-58,45	3,940
48	-89,04	0	-24,40	-29,06	-56,19	4,218

Fuente. Autor

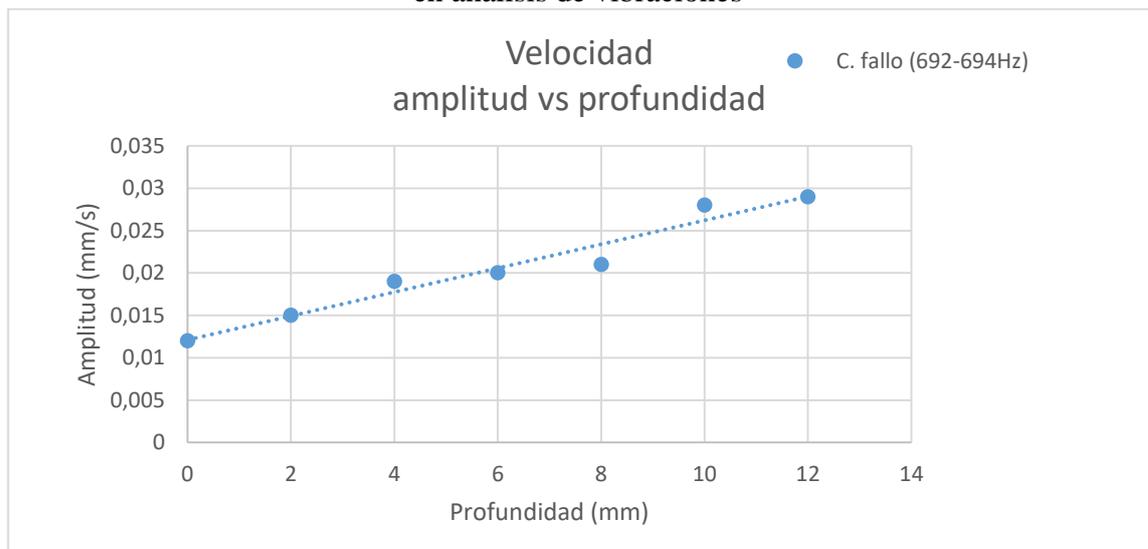
CAPÍTULO V

5. ANÁLISIS Y RESULTADOS

5.1 Resultados en análisis de barras rotas

5.1.1 *Análisis de resultados de vibraciones mecánicas en ensayo de barras rotas.*
La frecuencia característica de fallo para el caso de barras rotas es constante ubicada en intervalo corto de 692Hz a 694Hz, de la gráfica resultante se concluye que a medida que se incrementa la profundidad de daño, mediante el mecanizado practicado a una barra aleatoria por medio de la perforación gradual con una broca de 6mm de diámetro, la amplitud va creciendo.

Figura 52. Curva amplitud vs profundidad para frecuencia característica de barras rotas en análisis de vibraciones



Fuente. Autor

Cuando una barra está dañada la corriente que circula por dicha barra se ve interrumpida de tal manera que el campo magnético giratorio se ve interrumpido por el efecto que este causa.

En la gráfica se observa que la amplitud crece a un valor máximo de 0,029mm/s, a la máxima profundidad de 12mm, es decir cuando la barra ya está completamente seccionada. Sin embargo cuando se tienen dos o tres barras seccionadas completamente presentan una amplitud máxima de 0,032 mm/s en ambos casos, de esto se puede concluir

que la amplitud se estabilizará en este valor pese al número de barras seccionadas, significando que un análisis de vibraciones mecánicas nos permitirá identificar con certeza dos barras rotas, cabiendo la posibilidad de que existan más barras con daño.

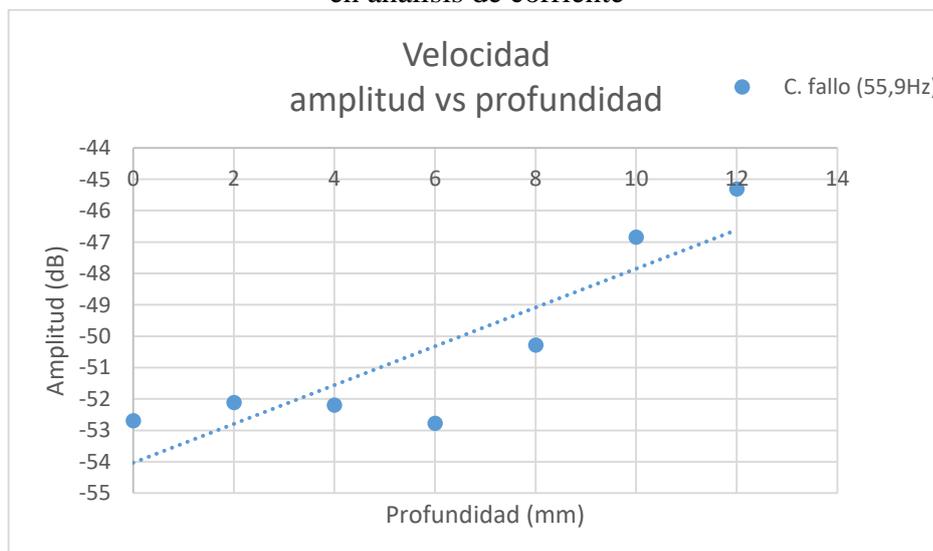
Se observa una última amplitud de mayor valor igual a 0,044mm/s, y en la posición de 0 mm de profundidad, dicha condición se da por el particular de que a cada barra seccionada se le practicó un mecanizado de roscado interno, en donde se alojaron pernos prisioneros con la finalidad de regresar el circuito de las barras a una condición normal de maquina sana, lo cual resulta siendo negativo puesto que en lugar de observar un decrecimiento de la amplitud a la frecuencia característica de falla, ésta se ve aumentada.

El material de cada perno prisionero alojado en la perforación de cada barra es acero al carbono mientras que las barras son de aluminio, ésta sería la posible causa de que se dé este incremento en la amplitud, lo cual genera una mayor severidad de daño, resultando inconveniente la colocación de los pernos prisioneros.

5.1.2 *Análisis de resultados de espectro de la corriente en ensayo de barras rotas.*

El espectro de la corriente del estator no se le analiza en la escala lineal debido a la poca información que ésta presenta, por lo cual este análisis se lo realiza en la ventana de grafica logarítmica en donde los valores se dan en decibeles dB, y nos dan una lectura de magnitudes negativas.

Figura 53. Curva amplitud vs profundidad para frecuencia característica de barras rotas en análisis de corriente



Fuente. Autor

Al igual que en el análisis de vibraciones mecánicas, para el análisis espectral de la corriente del estator, las barras rotas presentan una frecuencia característica de fallo, ésta debe mantenerse constante durante el procedimiento y toma de medidas, correspondientemente la variación debe darse en términos de amplitud, cuanto más avanza el corte de las barras la amplitud deberá ir creciendo gradualmente.

En la figura 52, se puede analizar que si bien existe una variación en la amplitud, ésta no se da de forma gradual presentando un decrecimiento cuando en una barra se ha practicado una perforación de 6mm de profundidad. A partir de este valor y con mayor perforación en la barra si se incrementa la amplitud llegando al valor máximo correspondiente a una barra rota en -45,31dB.

Cuando se ha roto completamente una segunda y tercera barra la amplitud disminuye en lugar de aumentar -43,21dB para dos barras rotas y -42,85dB para tres barras rotas, en éste caso se observa que el análisis de la corriente tiende a ser menos efectivo que el análisis de las vibraciones mecánicas, generando errores de interpretación en el caso de realizar el estudio de la corriente que alimenta al estator.

En éste caso se observa que cuando se colocan los pernos prisioneros, a fin de regresarlas al circuito normal a las barras, la amplitud si decrece suponiendo un regreso a la normalidad y buen funcionamiento de las mismas, aunque suponga solamente un arreglo parcial puesta que la amplitud no decrece al mismo valor que la amplitud original de un rotor sano.

5.2 Resultados en análisis de excentricidad estática permanente (bomba)

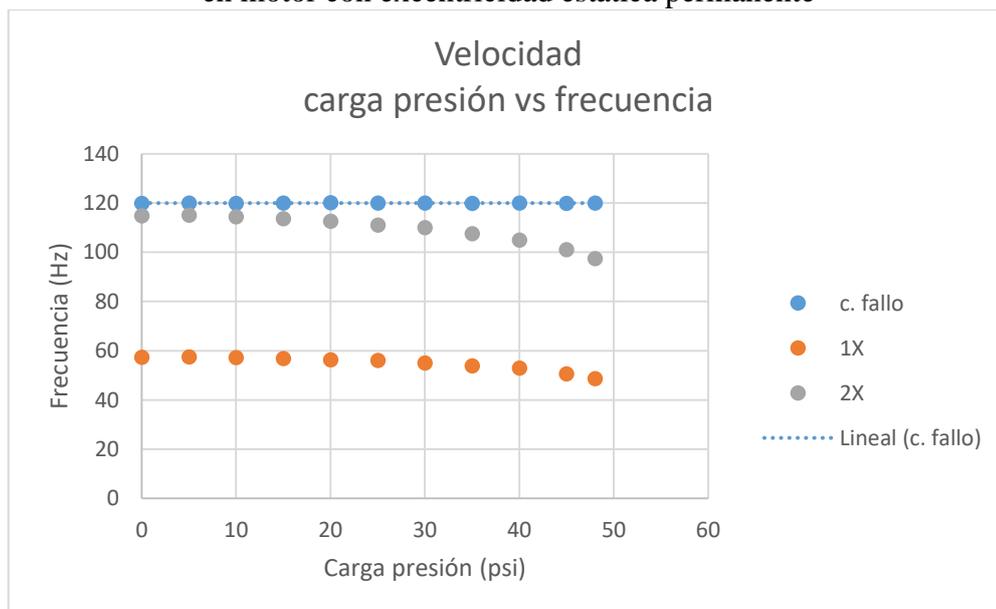
5.2.1 *Análisis de resultados de vibraciones mecánicas en ensayo de excentricidad estática permanente.*

5.2.1.1 *Análisis de frecuencia en vibraciones mecánicas.* Como es conocida la excentricidad estática presenta un armónico característico a una frecuencia específica en el análisis de vibraciones mecánicas, la frecuencia es igual a 2FL, es decir el doble de la frecuencia de línea, a 120Hz se debe verificar la existencia del armónico correspondiente a la excentricidad estática.

Las condiciones de este ensayo experimental son de régimen de carga variable, en este motor ya existe el modo de falla de excentricidad estática en un grado permanente por lo cual no es posible aumentar o disminuir la severidad del modo de falla, para este caso se varía la carga al motor, por lo cual debe existir una variación en el armónico fundamental de giro y en los armónicos de orden superior excepto en el armónico característico de falla a 120Hz.

La excentricidad estática genera un armónico a frecuencia característica la cual no tiene que verse involucrada con los escenarios de carga que se aplique a la máquina, por consiguiente el objetivo es observar que el armónico correspondiente a la excentricidad estática se mantenga permanente en el dominio frecuencial del espectro de velocidad en el análisis de vibraciones mecánicas.

Figura 54. Curva carga vs frecuencia en análisis de espectro de vibraciones mecánicas en motor con excentricidad estática permanente



Fuente. Autor

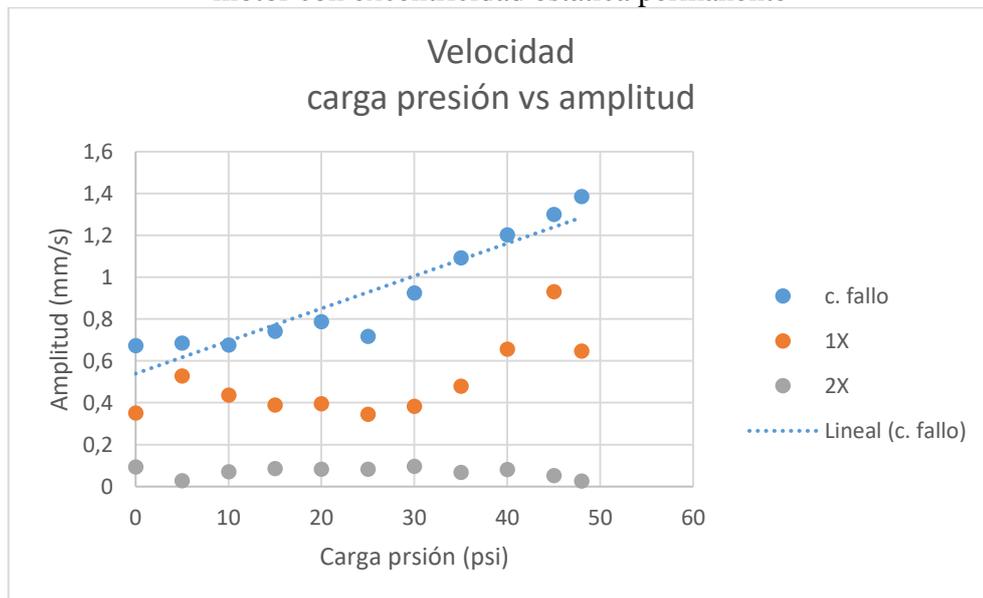
En las curvas obtenidas del análisis de vibraciones mecánicas en el espectro de velocidad presentado en la figura 53, se observa de forma clara la variación de cada armónico desde el 1X y los de orden superior 2X, en el dominio de la frecuencia dentro del espectro existe un decrecimiento de la magnitud de la frecuencia fundamental de giro, esto se debe a la carga aplicada de forma gradual que se va aplicando al sistema de bombeo por medio de la estrangulación del caudal de bombeo, a través de la válvula ubicada en la línea de descarga de la bomba.

Cuando se aumenta la carga el motor disminuye la velocidad del eje aumentando el porcentaje de deslizamiento y generando la variación de los armónicos 1X, 2X y 4X.

La curva característica correspondiente a la excentricidad estática, se mantiene constante sin variar en el dominio de frecuencia a pesar de la variación de carga, quiere decir que al existir la falla de forma permanente y con amplitud constante, el armónico se mantiene en un mismo punto de forma independiente a la velocidad de eje que varía en función a la carga, por lo cual nos lleva a la conclusión de que dicho armónico ubicado a 120Hz, visualizado en el eje de abscisas de la gráfica, si corresponde a la excentricidad estática.

5.2.1.2 *Análisis de amplitud en vibraciones mecánica.* La amplitud determina la severidad o intensidad del modo de falla de cualquier modo de falla, por lo cual es correspondiente analizar la evolución de la amplitud en el análisis de vibración del espectro de velocidad.

Figura 55. Curva carga vs amplitud en análisis de espectro de vibraciones mecánicas en motor con excentricidad estática permanente



Fuente. Autor

Se observa en la figura 54 que la amplitud en la curva característica de fallo si crece en función a la carga, esto debido que a mayor régimen de carga más se incrementa la severidad de la falla, se concluye que a partir de los 35 psi de presión, la amplitud se incrementa de tal forma que puede generar fallos funcionales de manera acelerada, correspondientes a la excentricidad estática.

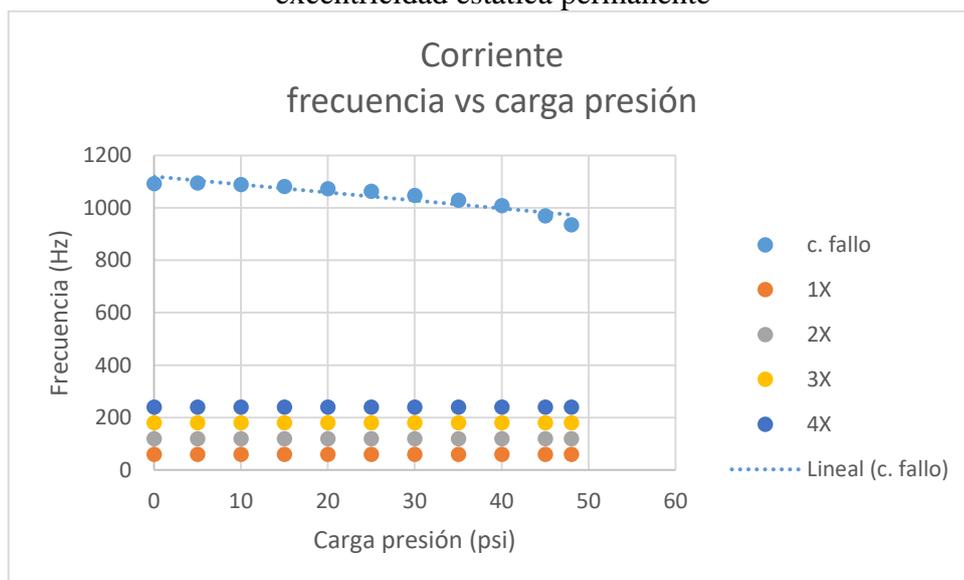
El armónico 1X es también el que se ve afectado por el incremento de la carga, resultando curioso la caída de la amplitud a máxima carga, correspondiente a los 48 psi, mientras que los armónicos de mayor orden se mantienen estables en función a la carga.

El valor global de vibraciones RMS también aumenta con la carga, al tratarse de un valor total influye el aumento individual de amplitudes generando esta curva con tendencia creciente.

5.2.2 Análisis de resultados de análisis de la corriente en ensayo de excentricidad estática permanente.

5.2.2.1 Análisis de frecuencia en análisis de corriente del estator.

Figura 56. Curva carga vs frecuencia en análisis de espectro de corriente en motor con excentricidad estática permanente



Fuente. Autor

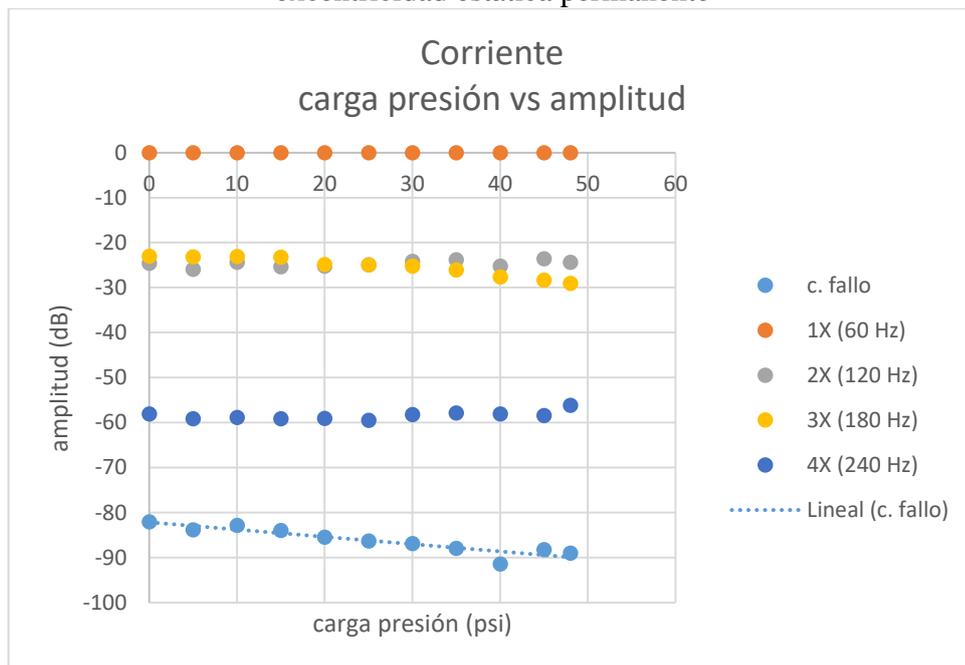
El comportamiento de los armónicos fundamentales 1X, 2X, 3X y 4X en el espectro de corriente del estator se mantienen estables en función sin verse afectados por la variación de la carga progresiva como se puede observar en las curvas presentadas en la figura 55, el armónico fundamental 1X a 60Hz y los de orden superior generan una línea continua en todo momento, esto se debe a que las frecuencias características de funcionamiento tienen un comportamiento independiente al modo de falla o régimen de carga aplicado. Se observa una variación muy marcada aparte a las frecuencias fundamentales de red es decir un pico correspondiente a la falla de excentricidad estática.

La frecuencia característica de falla correspondiente a la excentricidad estática es función del deslizamiento y éste a su vez es función de la carga que se le aplique al conjunto motor-bomba mediante el aumento de la presión de línea de descarga.

A medida que se aumenta la carga del motor, la frecuencia característica de falla correspondiente a la excentricidad estática, experimenta una variación en el dominio frecuencial, con lo cual queda demostrado que efectivamente las frecuencias calculadas que se muestran en la tabla 23, corresponden a la frecuencia característica de la excentricidad estática para el caso del análisis de la corriente del estator, las frecuencias reales son las que se presentan en la figura 55 y corresponden a los valores de frecuencia característica de falla de la tabla 24.

5.2.2.2 *Análisis de amplitud en análisis de corriente del estator.*

Figura 57. Curva carga vs amplitud en análisis de espectro de corriente en motor con excentricidad estática permanente



Fuente. Autor

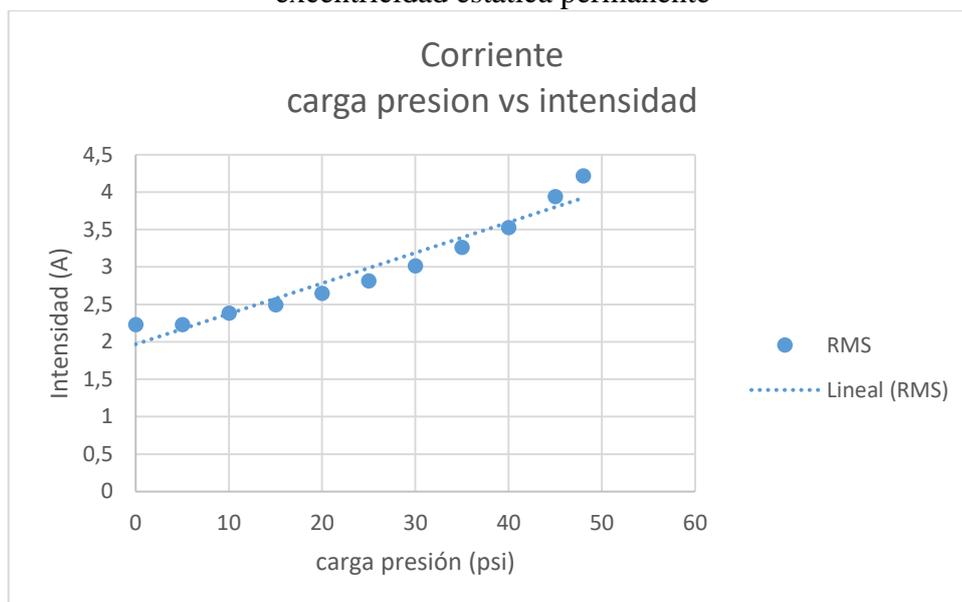
El estudio final en el análisis de la corriente de alimentación del estator, consiste en la observación de la evolución y comportamiento de las amplitudes de los armónicos en función del aumento gradual de la carga, a fin de identificar si en este análisis se puede evidenciar un incremento de amplitud que pueda generar mayor intensidad de daño en las maquinas rotativas.

Se puede observar claramente en la figura 56 que el armónico característico de falla presenta una variación pequeña, la cual no aporta con información trascendente que nos pueda dar a conocer una posible severidad alta mientras la maquina experimenta el daño de excentricidad estática.

El armónico fundamental de la red y los de orden superior no presentan ninguna variación importante a pesar de que la carga se vaya incrementando, concluyendo que el análisis de la corriente que alimenta el estator de la maquina asincrónica, no posee el alcance de identificar severidad en los daños.

En el análisis espectral de la corriente una curva particular que aporta con mucha información es la que se genera con el valor global RMS, que nos muestra el comportamiento de la intensidad en función a la carga aplicada.

Figura 58. Curva carga vs amplitud en análisis de espectro de corriente en motor con excentricidad estática permanente



Fuente. Autor

La intensidad respecto a la carga experimenta un aumento progresivo en función al incremento de la carga que se va dando al motor, hasta 35 psi de presión, la intensidad se mantiene en un nivel moderado de corriente, desde este punto en adelante el motor entra a trabajar en régimen de sobrecarga, lo cual puede ocasionar daños en los devanados del estator por sobre intensidad, significa que la maquina rotativa funciona a carga normal con una presión igual o menor a los 35 psi.

La curva característica posee una tendencia directamente proporcional, entre la carga y la intensidad de corriente que alimenta al estator.

5.3 Análisis de efectividad de los tipos de diagnóstico técnico

El análisis de la efectividad de los modelos de diagnóstico técnico se da en función al aporte de información que cada uno de los modelos de diagnóstico técnico arroje, la cantidad de variables que cada análisis otorgue para el análisis fundamentan la efectividad individual, éste criterio nos sirve para llegar a la conclusión del presente proyecto.

El ensayo de vibraciones mecánicas en los dos modos de falla, barras rotas y excentricidad estática, aporta con valores de frecuencia y de amplitud, es decir nos da a conocer los detalles de la presencia de los modos de falla y mediante la amplitud se puede determinar la severidad de los modos de falla. El análisis de la corriente que alimenta al estator en ambos modos de falla, permitió visualizar detalles de frecuencia característica de falla, aunque la amplitud no se observó de forma clara como en el análisis de vibraciones mecánicas, aunque no se puede decir que no haya la variación en términos de amplitud.

En conclusión los modelos mixtos de diagnóstico de falla resultan efectivos en ambos casos, con el particular de que el análisis de vibraciones aporta con valores más claros de amplitud.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

El diagnóstico técnico mediante análisis de vibraciones mecánicas, supera la efectividad del análisis espectral de la corriente de alimentación del estator de los motores de inducción, el aporte de información sobre la dinámica de la amplitud genera mayor capacidad de interpretación e identificación de los modos de falla determinados.

La mayor información mediante la cual se puede emitir informes y posteriores órdenes de mantenimiento se obtiene con la aplicación de la técnica de vibraciones mecánicas sobre la técnica de análisis de la corriente.

Los equipos simuladores de falla cumplen satisfactoriamente con las condiciones operativas requeridas y la reacción ante las fallas provocadas intencionalmente.

En motor con barras rotas mediante vibraciones mecánicas presenta el valor de frecuencia de falla igual a 692Hz que coincide con el valor calculado mediante la ecuación 4.

Mediante el análisis espectral de la corriente para el caso del motor con barras rotas se identificó el armónico de falla en el dominio frecuencial con un valor de 55,9Hz cuyo resultado también se evidencia mediante la ecuación 6.

La excentricidad estática presenta el armónico de falla correspondiente al espectro de vibración mecánica a 2FL, lo cual garantiza la veracidad de la bibliografía empleada.

6.2 Recomendaciones

Realizar las prácticas siguiendo los protocolos de calibración, mantenimiento y seguridad que se describen en el proyecto a fin de garantizar un buen procedimiento de réplica de la práctica, logrando alcanzar resultados positivos y esperados, para lograr experimentar en el futuro los procesos especificados.

Considerar las actividades previas que se deben llevar a cabo por parte de los operarios, con la finalidad de que el objetivo se alcance, mediante el cumplimiento de parámetros definidos en el anexo B, el checklist de mantenimiento ayudara a tener los módulos calibrados y lubricados adecuadamente a fin de obtener una toma de medidas adecuada y de fácil interpretación.

Analizar los datos empleando ventanas o configuraciones disponibles en el software del equipo idear, existe una serie de posibilidades las cuales nos permiten realizar los estudios espectrales de formas variadas, y con mayores capacidades graficas entre otras.

BIBLIOGRAFÍA

HIDALGO, Juan. *Análisis de las zonas de falla de Motores Eléctricos.* Costa Rica-San José: Termogram, 2008, pp. 24-31

CUATRECASAS ARBÓZ, Lluís. *TPM en un entorno Lean Management.* España-Barcelona : Profit, 2010, pp. 97-108

FLORES, Roberto. *Diagnóstico de Fallas en Máquinas Eléctricas Rotatorias Utilizando la Técnica de Espectros de Frecuencia de Bandas Laterales.* México-Guatemala: Sepi-Esime, 2011, pp. 22-31

TALBOT, Christian. *Diagnóstico de la Condición de las Barras de Motores de Inducción.* Chile-Concepción: Información Tecnológica, 2013, pp. 24-28

DUQUE PÉREZ, Óscar. *Motores de Inducción Técnicas de Mantenimiento Predictivo.* España-Badajoz: @becedario, 2005, pp. 270-311

FERNÁNDEZ CABANAS, Manés *Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas.* España-Barcelona: Marcombo, 1998, pp. 78-86

GARCIA, Manuel *Técnicas de diagnóstico.* España-Barcelona: s.n., 2014, pp. 12-27

GONZÁLEZ FERNÁNDEZ, Francisco Javier. *Teoría y Práctica de Mantenimiento Industrial Avanzado.* España-Madrid: Fundación Confemetal, 2005, pp 112-123

GONZÁLEZ PÉREZ, Joaquín. *Montaje y mantenimiento de máquinas eléctricas rotativas ELEE0109.* Málaga-Antequera: Innovación y Cualificación S.L., 2012, pp. 97-128

KOSOW, Irving *Máquinas eléctricas y transformadores.* Mexico-Guatemala: Prentice-Hall Hispanoamericana S.A., 1993, pp. 10-13

PALOMINO MARÍN, Evelio. *Elementos de Medicion y Análisis de Vibraciones en Máquinas Rotatorias.* Cuba-La Habana: CEIM, 2007, pp. 65-71

RAMÍREZ VÁSQUEZ, José. *Máquinas de Corriente Alterna, Enciclopedia CEAC de electricidad.* España-Barcelona: CEAC S.A., 1973, PP. 91-96

WHITE, Glen. *Introducción al Análisis de Vibraciones.* Estados Unidos-Woburn: Azima DLI, 2010, pp. 78-93

UNE-EN13306. *Mantenimiento. Terminología del mantenimiento. Parte 2:Términos Fundamentales.*

CREUS, Instrumentación Industrial. Octava Edición. México-Guatemala: Alfaomega Grupo Editor, 2010. pp. 792-795

