

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,

INFORMÁTICA Y MECÁNICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



TESIS

**PLANIFICACIÓN DEL MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA
OPERACIÓN EFICIENTE MEDIANTE LA MATRIZ DE FALLAS DEL
MOTOR TRIFÁSICO DE INDUCCIÓN, 2024**

PRESENTADO POR:

Br. PERCY FORTUNATO CAVERO QUISPE.

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO ELECTRICISTA.**

ASESOR:

Ing. PABLO APAZA HUANCA.

CUSCO-PERÚ

2026



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor Pablo Apaza Huanca
..... quien aplica el software de detección de similitud al
trabajo de investigación/tesis titulada:

PLANIFICACIÓN DEL MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA
OPERACIÓN EFICIENTE MEDIANTE LA MATRIZ DE FALLAS DEL
MOTOR TRIFÁSICO DE INDUCCIÓN, 2024

Presentado por: Percy Fortunato Cervero Quispe DNI N° 42561690 ;
presentado por: — DNI N°: —

Para optar el título Profesional/Grado Académico de

Ingeniero electricista

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 03 veces, mediante el
Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de**
Similitud en la UNSAAC y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 9.....%.

**Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a
grado académico o título profesional, tesis**

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 19 de Agosto de 2026

Pablo Apaza Huanca
Firma

Post firma Pablo Apaza Huanca

Nro. de DNI 23842746

ORCID del Asesor 0000-0002-3941-1347

Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: oid: 27259:614090334?
locale=es-MX

Percy Caverro Quispe

PLANIFICACIÓN DEL MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA OPERACIÓN EFICIENTE MEDIANTE LA MATRIZ DE FALLAS D...



Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:614090334

Fecha de entrega

13 ago 2026, 9:57 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

20 ago 2026, 2:13 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

TESIS - PERCY CAVERO - MAYO 2026 CORREGIDO.pdf

Tamaño del archivo

2.1 MB

137 páginas

36.347 palabras

209.852 caracteres

9% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 16 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 9%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 5%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Texto oculto**
25 caracteres sospechosos en N.º de páginas
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

ÍNDICE GENERAL

Índice de tablas

Índice de figuras

Resumen

Abstract

Introducción

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1 ÁMBITO GEOGRÁFICO	1
1.2 EL PROBLEMA	1
1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	6
1.3.1 PREGUNTA GENERAL	6
1.3.2 PREGUNTAS ESPECÍFICAS	6
1.4 OBJETIVOS	6
1.4.1 OBJETIVO GENERAL	6
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
1.5 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	6
1.5.1 JUSTIFICACIÓN TEÓRICA	6
1.5.2 JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA	7
1.5.3 JUSTIFICACIÓN TÉCNICA	7
1.6 ALCANCES Y LIMITACIONES	8
1.6.1 ALCANCES	8
1.6.2 LIMITACIONES	8
1.7 HIPÓTESIS	8
1.7.1 HIPÓTESIS GENERAL	8
1.7.2 HIPÓTESIS ESPECÍFICA	9
1.8 VARIABLES E INDICADORES	9
1.8.1 VARIABLES	9
1.8.2 INDICADORES	9
1.9 METODOLOGÍA	9
1.9.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN	9
1.9.2 DISEÑO DEL ESTUDIO	10
1.9.3 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN	10
1.9.4 POBLACIÓN Y MUESTRA	10

1.9.5 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	10
1.9.6 TÉCNICAS	10
1.9.7 INSTRUMENTOS	10
1.9.8 CONFIABILIDAD DE LOS INSTRUMENTOS	10
1.9.9 VALIDEZ DE LOS INSTRUMENTOS	11
1.9.10 TÉCNICAS DE PROCESAMIENTOS Y ANÁLISIS DE DATOS	11
1.10 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	12
1.11 MATRIZ DE CONSISTENCIA	12
 CAPÍTULO II: EL MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	15
2.1 ANTECEDENTES	15
2.2 BASES TEÓRICAS.....	18
2.2.1 MOTORES ELÉCTRICOS Y EL MANTENIMIENTO	18
2.2.2 ANÁLISIS DE CRITICIDAD EN MÁQUINAS ELÉCTRICAS.....	24
2.2.3 FUNDAMENTOS DEL ANÁLISIS DE CRITICIDAD.....	28
2.2.4 LA MÁQUINA TRIFÁSICA DE INDUCCIÓN	29
2.3 MARCO CONCEPTUAL.....	37
2.3.1 PLANIFICACIÓN	37
2.3.2 MANTENIMIENTO DE LA MÁQUINA ELÉCTRICA.....	38
2.3.3 MATRIZ DE FALLAS	38
2.3.4 RIESGOS Y CAUSAS DE FALLAS	39
2.3.5 MARCO NORMATIVO	39
 CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE CRITICIDAD DEL MOTOR DE INDUCCIÓN.....	40
3.1 GENERALIDADES	40
3.2 DETERMINACIÓN DE FRECUENCIA DE FALLAS.....	41
3.3 DETERMINACIÓN DE CONSECUENCIA	41
3.4 PRINCIPALES CRITERIOS PARA EL ANÁLISIS DE CRITICIDAD.....	41
3.5 TABLA DE FACTORES PONDERADOS DE LA CRITICIDAD	42
3.6 MATRIZ DE CRITICIDAD	44
 CAPÍTULO IV: LA MATRIZ DE FALLAS DEL MOTOR DE INDUCCIÓN	49
4.1 GENERALIDADES	49
4.2 MATRIZ DE FALLA DEL ESTATOR DEL MOTOR DE INDUCCIÓN	50

4.2.1 MODO DE FALLO: EL MOTOR NO ARRANCA	50
4.2.2 MODO DE FALLO: POR AISLAMIENTO ELÉCTRICO.....	54
4.2.3 MODO DE FALLO: POR SOBRETENSIÓN Y PRESENCIA DE ARMÓNICOS ...	57
4.2.4 MODO DE FALLO: DE AISLAMIENTO DEBIDO A LA CONTAMINACIÓN.....	60
4.2.5 MODO DE FALLO: POR SOBRECARGA	63
4.2.6 MODO DE FALLO: EN EL CIRCUITO MAGNÉTICO DEL ESTATOR	67
4.3 MATRIZ DE FALLA EN EL ROTOR DEL MOTOR DE INDUCCIÓN.....	69
4.3.1 MODO DE FALLO: EN BARRA O JAULA DE ARDILLA DEL ROTOR	69
4.3.2 MODO DE FALLO: DAÑO EN ACERO ACTIVO O MATERIAL MAGNÉTICO ...	72
4.3.3 MODO DE FALLO: FRACTURA O FLEXIÓN DEL EJE	75
4.3.4 MODO DE FALLO: PÉRDIDAS EN LA ZONA DEL RODAMIENTO.....	78
4.3.5 MODO DE FALLO: POR DESBALANCE	80
4.3.6 MODO DE FALLO: POR DAÑOS EN NÚCLEO MAGNÉTICO DEL ROTOR	82
4.4 MATRIZ DE FALLA EN LOS RODAMIENTOS MOTOR DE INDUCCIÓN.....	85
4.4.1 MODO DE FALLO: POR VIBRACIONES ELEVADAS DEL RODAMIENTO.....	85
4.4.2 MODO DE FALLO: POR ELEMENTO RODANTE (BOLAS O CILINDROS)	88
4.4.3 MODO DE FALLO: POR VIBRACIÓN EN RODAMIENTOS DE FRICCIÓN	92
 CAPÍTULO V: LA PLANIFICACIÓN DEL MANTENIMIENTO PREVENTIVO	96
5.1 GENERALIDADES	96
5.2 MODELADO GRÁFICO DE LA PLANIFICACIÓN DEL MANTENIMIENTO PREVENTIVO.....	96
5.2.1 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL MANTENIMIENTO PREVENTIVO... ..	96
5.2.2 VENTAJAS DEL MANTENIMIENTO PREVENTIVO	96
5.3 EL DIAGNÓSTICO.....	98
5.3.1 IDENTIFICACIÓN DE COMPONENTES CRÍTICOS.....	98
5.3.2 CUADRO DE CRITICIDAD	98
5.3.3 TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO.....	99
5.3.4 DOCUMENTACIÓN DE RESULTADOS	100
5.4 ORGANIZACIÓN	100
5.4.1 LOS PROCEDIMIENTOS OPERATIVOS.....	100
5.4.2 ANÁLISIS DE LA MATRIZ DE FALLAS	101
5.5 PROGRAMACIÓN DEL MANTENIMIENTO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN ...	101
5.5.1 EL ESTATOR DEL MOTOR DE INDUCCIÓN	102

5.5.2 EL ROTOR DEL MOTOR DE INDUCCIÓN	102
5.5.3 LOS RODAMIENTOS DEL MOTOR DE INDUCCIÓN.....	103
5.5.4 LA TAPA O CUBIERTA FRONTAL DEL MOTOR DE INDUCCIÓN	103
5.5.5 EL EJE DEL MOTOR DE INDUCCIÓN	104
5.5.6 LA CARCASA DEL MOTOR DE INDUCCIÓN	104
5.5.7 LA PLACA DE CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR DE INDUCCIÓN	104
5.5.8 LA BASE MECÁNICA DEL MOTOR DE INDUCCIÓN	105
5.5.9 EL VENTILADOR DEL MOTOR DE INDUCCIÓN	105
5.5.10 LA TAPA O CUBIERTA POSTERIOR DEL MOTOR DE INDUCCIÓN.....	105
5.5.11 LOS DEVANADOS DEL ESTATOR DEL MOTOR DE INDUCCIÓN.....	106
5.5.12 LA JAULA DE ARDILLA DEL ROTOR DEL MOTOR DE INDUCCIÓN.....	106
5.5.13 LOS EMPAQUES DEL MOTOR DE INDUCCIÓN.....	107
5.5.14 LAS BORNERAS DEL MOTOR DE INDUCCIÓN	107
5.5.15 LOS ACCESORIOS DEL MOTOR DE INDUCCIÓN	107
 CAPÍTULO VI: LOS RESULTADOS Y DISCUSIÓN	 109
6.1 GENERALIDADES	109
6.2 LA CRITICIDAD COMO RESULTADO DEL OBJETIVO	109
6.2.1 DIFERENCIACIÓN DE ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO	110
6.2.2 OPTIMIZACIÓN DE FRECUENCIAS DE MANTENIMIENTO Y RECURSOS ...	110
6.2.3 REQUERIMIENTOS TECNOLÓGICOS Y ESPECIALIZACIÓN	110
6.2.4 REDUCCIÓN DEL RIESGO OPERATIVO.....	110
6.3 LA MATRIZ DE FALLAS COMO RESULTADO DEL OBJETIVO.....	111
6.4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	112
6.4.1 DISCUSIÓN DE RESULTADOS DEL OBJETIVO GENERAL	112
6.4.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS DEL OBJETIVO ESPECÍFICO	113
CONCLUSIONES	
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	

1.4 ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Empresas del Cusco dedicadas a la reparación y mantenimiento

Tabla 2. Operacionalización de variables

Tabla 3. Matriz de consistencia

Tabla 4. Factores ponderados de criticidad

Tabla 5. Matriz de criticidad de componentes principales del motor de inducción

Tabla 6. Matriz de fallo del motor de Inducción

Tabla 7. Motores de fallo por aislamiento I

Tabla 8. Matriz de fallo por sobretensión externa, interna y armónicos

Tabla 9. Matriz de fallo por aislamiento

Tabla 10. Matriz de fallo por sobrecarga

Tabla 11. Matriz de fallo en la jaula de ardilla del rotor

Tabla 12. Matriz de fallo en acero activo o circuito magnético

Tabla 13. Matriz de fallo en fractura de eje del rotor

Tabla 14. Matriz de fallo por las pérdidas de ajuste en la zona de rodamiento

Tabla 15. Modo de fallo por desbalance

Tabla 16. Modo de fallo por daños en el núcleo magnético del rotor

Tabla 17. Modo de fallo por vibración del rodamiento

Tabla 18. Modo de fallo por elemento rodante

Tabla 19. Modo de fallo por vibración en rodamientos de fricción

Tabla 20. Cuadro de criticidad basado en la posibilidad de reparación

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura1. *Ubicación geográfica departamento del Cusco*

Figura 1. *Concesiones mineras en el departamento de Cusco*

Figura 3. *Niveles de riesgo en la criticidad*

Figura 4. *Diagrama de Riesgos, Probabilidad de fallas y Consecuencias*

Figura 5. *Matriz de criticidad*

Figura 2. *Componentes estructurales del motor trifásico de inducción*

Figura 7. *Componentes estructurales del motor trifásico de inducción: Estator y rotor*

Figura 8. *Circuito equivalente por fase del motor de inducción y las pérdidas*

Figura 9. *Curvas de corriente, par y potencia con relación al deslizamiento o resbalamiento*

Figura 10. *El motor de inducción trifásico*

Figura 11. *Componentes principales del motor de inducción trifásico*

Figura 12. *Cualificación de criticidad*

Figura 13. *Niveles de criticidad en las componentes principales del motor de inducción trifásico*

Figura 14. *Componentes que podrían fallar en una conexión estrella-triángulo*

Figura 15. *Modelo Gráfico de la Planificación del Mantenimiento Preventivo*

RESUMEN

El mantenimiento preventivo comprende un conjunto de procesos de inspección periódica y operaciones planificadas a intervalos predefinidos, orientados a garantizar la confiabilidad operativa del motor trifásico de inducción y prevenir fallas durante su vida útil. El objetivo de la investigación fue desarrollar un Plan de Mantenimiento Preventivo para optimizar la operación del motor trifásico de inducción mediante la sistematización de la matriz de fallas y el análisis de criticidad.

La investigación fue de tipo aplicada, nivel explicativo y diseño cuasi experimental. La muestra estuvo conformada por 13 talleres seleccionados mediante muestreo por conveniencia, a los cuales se aplicaron encuestas para determinar la criticidad de los componentes del motor y establecer la matriz de fallas.

Los resultados permitieron identificar los diferentes niveles de criticidad de los componentes del motor, estableciendo prioridades para la ejecución de las actividades de mantenimiento. Asimismo, la matriz de fallas permitió sistematizar el análisis de los procesos, modos de fallo, efectos, causas y controles de mantenimiento.

La planificación del mantenimiento preventivo se estructuró en tres procesos fundamentales: diagnóstico, organización y programación. El diagnóstico, basado en el análisis de criticidad, permitió priorizar los componentes según su impacto operativo. La organización, mediante la matriz de fallas, facilitó la identificación sistemática de riesgos y acciones de mantenimiento. Finalmente, la programación estableció actividades, frecuencias y controles para asegurar la continuidad operativa, reducir tiempos de inactividad y mejorar la confiabilidad y eficiencia del motor.

Palabras clave: *Mantenimiento preventivo, Motor trifásico, Análisis de criticidad, Matriz de fallas, Planificación del mantenimiento.*

ABSTRACT

Preventive maintenance comprises a set of periodic inspection processes and planned operations carried out at predefined intervals, aimed at ensuring the operational reliability of the three-phase induction motor and preventing failures throughout its service life. The objective of this research was to develop a Preventive Maintenance Plan to optimize the operation of a three-phase induction motor through the systematization of the failure matrix and criticality analysis.

The research was applied in nature, explanatory in scope, and employed a quasi-experimental design. The sample consisted of 13 workshops selected through convenience sampling, where surveys were administered to determine the criticality of the motor components and establish the failure matrix.

The results made it possible to identify the different criticality levels of the motor components, establishing priorities for maintenance activities. Likewise, the failure matrix enabled the systematic analysis of processes, failure modes, effects, causes, and maintenance controls.

Preventive maintenance planning was structured around three fundamental processes: diagnosis, organization, and scheduling. Diagnosis, based on criticality analysis, made it possible to prioritize components according to their operational impact. Organization, through the failure matrix, facilitated the systematic identification of risks and maintenance actions. Finally, scheduling established activities, frequencies, and controls to ensure operational continuity, reduce downtime, and improve the reliability and efficiency of the motor.

Keywords: Preventive maintenance, Three phase motor, Criticality analysis, Failure matrix, Maintenance planning.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación titulado “*Planificación del mantenimiento preventivo para operación eficiente mediante la matriz de fallas del motor trifásico de inducción, 2024*” tiene como finalidad desarrollar una propuesta técnica orientada a mejorar la eficiencia operativa de los motores de inducción mediante una adecuada planificación del mantenimiento preventivo, sustentada en el análisis de fallas y la criticidad de sus componentes.

El estudio se estructura en seis capítulos que permiten abordar de manera progresiva y sistemática el problema de investigación.

En el Capítulo I se presenta el planteamiento del problema, donde se define el ámbito de estudio, la formulación del problema, los objetivos, la justificación, las hipótesis, las variables y la metodología empleada para el desarrollo de la investigación.

El Capítulo II desarrolla el marco teórico–conceptual, incluyendo los antecedentes relevantes, las bases teóricas relacionadas con los motores eléctricos, el mantenimiento, el análisis de criticidad y la matriz de fallas, así como el marco normativo que sustenta el estudio.

En el Capítulo III se aborda el análisis de criticidad del motor trifásico de inducción, considerando la frecuencia de fallas, las consecuencias asociadas y los criterios técnicos necesarios para la elaboración de la matriz de criticidad.

El Capítulo IV presenta el desarrollo de la matriz de fallas del motor de inducción, analizando los modos de falla del estator, rotor y rodamientos, identificando sus causas y efectos principales.

El Capítulo V está orientado a la planificación del mantenimiento preventivo, donde se establecen los procedimientos, la programación de actividades y las estrategias de mantenimiento basadas en los resultados de la matriz de fallas y la criticidad.

Finalmente, en el Capítulo VI se presentan los resultados obtenidos, su discusión y las conclusiones, destacando los aportes del estudio y su aplicabilidad en la gestión del mantenimiento de motores trifásicos de inducción.

El Autor

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Ámbito geográfico

La zona de influencia geográfica del presente estudio se inicia en la ciudad y región del Cusco (*figura 1*) en base a experiencias de taller para ser replicada y considerada en otras realidades ya que los motores trifásicos de inducción son de uso generalizado en los sistemas eléctricos de baja y media tensión

Figura 3

Ubicación geográfica departamento del Cusco



Nota. El gráfico muestra la Región y la provincia del Cusco, donde se encuentran ubicadas las empresas de dedicadas a la reparacion y mantenimiento de motores, los mapas se lograron mediante la captura de imágenes geográficas de Google

1.2 EL PROBLEMA

1.2.1 Planteamiento del problema

El mantenimiento es el proceso que garantiza la confiabilidad *operativa eficiente* de los activos fijos tangibles industriales (instalaciones, máquinas eléctricas, equipos y sistemas) durante su vida útil y prolongarlos para lograr los objetivos de la organización, fundamentalmente productivos.

Entre estos activos fijos tangibles se encuentran los motores trifásicos de inducción, cuya utilización cubre un amplio espectro industrial en el campo tecnológico productivo, comercial, residencial, electromovilidad y su aplicación es cada vez más compleja, así como los sistemas de control y protección inherentes, estas características indicadas condicionan la operatividad de tal forma que cualquier interrupción de servicio operativo de estas máquinas eléctricas incide en el logro de la competitividad y consecuentemente en la rentabilidad empresarial del producto o servicio prestado.

En tal sentido cabe mencionar que las actividades socioeconómicas que más requieren de mantenimiento o reparación de motores en la región de Cusco son las siguientes:

- Pequeña, mediana y gran minería, cuya incidencia se muestra en la Figura 2
- Hidrocarburos, gas y actividades mineras diversas
- Industria del turismo, restaurantes y hotelería
- Actividad agrícola y pecuaria
- Industria y manufactura
 - Parque Industrial
 - Industria del Mueble
 - Ladrilleras artesanales
- Sector construcción
 - Actividad edificadora
- Comercio
- Servicios gubernamentales
- Mercados y principales ferias
 - Mercados
 - Principales ferias
 - Centros comerciales, galerías y centros artesanales
 - Actividad comercial y de Servicios en las principales arterias
- Transporte y comunicaciones
 - Parque automotor

En la *Tabla 1* se puede ver las empresas dedicadas a la reparación y mantenimiento de motores eléctricos en la ciudad del Cusco, considerando la creación de algunas empresas, talleres que data del año 1989 los más antiguos y los modernos están entre los años 2012 y 2013, lo que significa que están empresas tienen muchos años de creación y en los últimos años no se han generado nuevas empresas en la ciudad del Cusco.

La gran mayoría de las empresas brindan su servicio en su local, lo que significa que los usuarios deben llevar sus motores a los locales donde se encuentran cada una de estas empresas, pero también se puede apreciar que algunos empresarios individuales, realizan el

mantenimiento en las viviendas o locales de los usuarios, generalmente esto sucede para diagnosticar el problema que tiene el motor.

Tabla 1

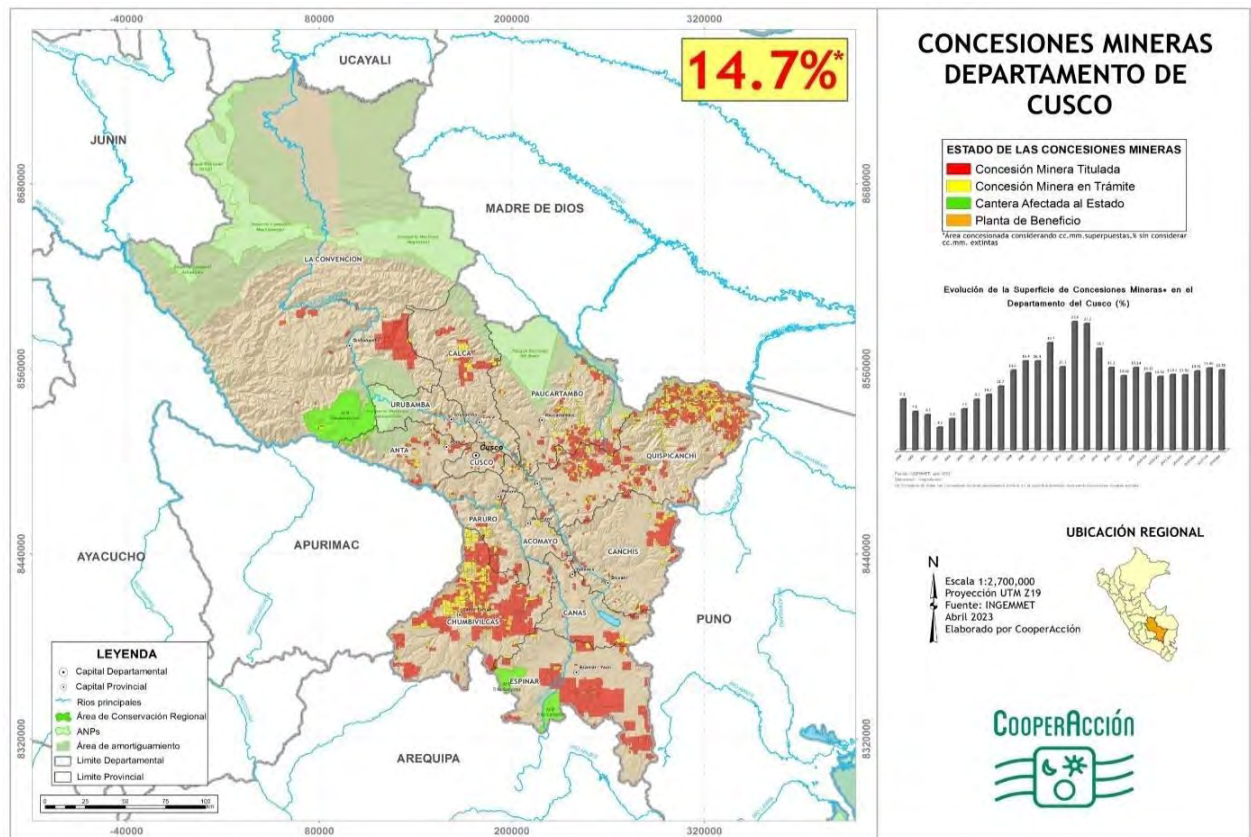
Empresas de Cusco dedicadas a la reparacion y mantenimiento de motores, años de creacion y sus características

Empresa	Año de creación	Servicio que brinda es en		Su local es		Sus ganancias lo invierten		N° de personas que laboran
		Taller	Usuario	Propio	Alquilado	Si	No	
Electro Watt	2006	Si	-	-	Si	Si	-	4
Servi Motores Cusco	1999	Si	-	-	Si	Si	-	3
ElectroMac	2003	Si	-	Si	Si	Si	-	4
Luna Electric	2013	Si	-	-	Si	Si	-	12
Rebobinados Coco	2009	Si	-	Si	-	Si	-	1
Rebobinados Montalvo	1989	Si	-	Si	-	Si	-	4
Motores y Generadores Cusco	1998	Si	-	-	Si	Si	-	11
Megawatts	2004	Si	-	-	Si	Si	-	6
JC electromecánica S.R.L.	2010	Si	-	-	Si	Si	-	5
Comercial Punto Azul	1995	Si	-	Si	-	Si	-	15
Tinselec - Instalaciones y Reparaciones Electrica	2009	Si	-	-	Si	Si	-	6
Sie E.I.R.L.	1999	Si	-	-	Si	Si	-	11
Ferrelectric	2012	Si	-	Si	-	Si	-	3
Establecimientos ubicados en distintos centros comerciales y mercados de abastos de la ciudad de Cusco	2000 a la fecha	Si	Si	-	Si	Si	-	1

Nota. Resultados de la encuesta y entrevistas realizadas a las principales empresas dedicadas al rubro de reparación y mantenimiento de motores eléctricos en la Ciudad del Cusco. [1]

Figura 4

Concesiones mineras en el departamento de Cusco



Nota. Las concesiones mineras en general tienen entre sus activos los motores eléctricos, por consiguiente se convierten en clientes potenciales del mantenimiento. Mapa de CooperAccion [3]

Por tanto, los centros o talleres de mantenimiento propios u outsourcing de las máquinas eléctricas tienen la responsabilidad de asegurar la ***operación eficiente permanente*** de los motores eléctricos garantizando la confiabilidad operativa, es decir realizar una función requerida bajo condiciones dadas por un intervalo de tiempo definido; sin embargo, estos centros o talleres mantenimiento tienen problemas relacionados con alguna o varios de los siguientes aspectos:

- Planificación del mantenimiento eficiente y eficaz de las máquinas eléctricas
- Métodos y procesos de mantenimiento preventivo y correctivo
- Base de datos dispersos e incompletos, sin seguimiento
- Comprensión de los objetivos empresariales y de mantenimiento
- Programación operativa, táctica y estratégica del mantenimiento
- Análisis de inversión en horas hombre, equipos y procesos

- Inventarios dinámicos y estructurados
- Análisis de fallas frecuentes
- Evaluación de causas y detección de fallas
- Sistemas de mejora continua

En ese marco, la **planificación del mantenimiento** se convierte en un proceso transversal que toma en cuenta entre otros aspectos el análisis de fallas frecuentes que se presentan en las máquinas eléctricas. De acuerdo con estadísticas: “La distribución de fallas en las distintas partes de los motores de inducción trifásicas se presentan en los rodamientos (cojinetes) en 41%, estator 36%, rotor 9% y otros 14%” (Dorrbercker, 2007, p.54). Esta información por supuesto no puede generalizarse para todos los casos en el espectro del mantenimiento; sin embargo, es una tendencia que muestra en forma muy resumida los niveles de criticidad en las componentes del motor de tal forma que puede ser una forma de estructurar el análisis de fallas en el motor.

Por otra parte, la manufactura de cada una de las componentes estructurales del Motor eléctrico de inducción trifásico (MEIT) sea eléctrico, magnético, mecánico y dieléctrico se encuentran en permanente mejora de calidad, funcionalidad y los componentes estructurales cada vez son más complejos y diversos, por lo que mantenerlos funcionando al máximo de su rendimiento supone todo un desafío en el proceso de la planificación del mantenimiento, el análisis de los métodos preventivo y correctivo, elaboración de una bases de datos, el análisis y evaluación de fallas y principalmente la elaboración de la matriz de fallas.

El presente proyecto de investigación analizó la planificación del mantenimiento de los motores trifásicos de inducción en su contexto de diagnóstico, organización y programación. Por otra parte, con la finalidad de evaluar las fallas frecuentes e integrales se procesará *la matriz de criticidad* y para determinar las causas comunes de desperfectos se elaborará la *matriz de fallas* como un método de solución al mantenimiento de las componentes estructurales sean estas del circuito eléctrico, magnético, mecánico, dieléctrico o térmico del motor trifásico de inducción de rotor de jaula de ardilla, debido a que esta matriz puede reducir o marcar la diferencia entre los tiempos de inactividad con su correspondiente lucro cesante y un mayor tiempo de funcionamiento ininterrumpido de la máquina eléctrica.

1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El problema planteado se formula de la siguiente manera:

1.3.1 Pregunta general

¿De qué manera la *matriz de fallas* garantiza la *planificación del mantenimiento preventivo* para la operación eficiente del motor trifásico de inducción, 2024?

1.3.2 Preguntas específicas

- a) ¿Cuáles son los principales procesos de la *planificación del mantenimiento preventivo* para la operación eficiente del motor trifásico de inducción con rotor jaula de ardilla, 2024?
- b) ¿Cuáles son las etapas estructurales de la *matriz de fallas* que garantizan la planificación del mantenimiento preventivo para la operación eficiente del motor trifásico de inducción, 2024?

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

“Desarrollar el *plan de mantenimiento preventivo* para la operación eficiente del motor trifásico de inducción mediante la sistematización de la *matriz de fallas* y de criticidad, 2024”.

1.4.2 Objetivos específicos

- a) Analizar los principales procesos de la *planificación del mantenimiento preventivo* para la operación eficiente del motor trifásico de inducción, 2024.
- b) Analizar las etapas estructurales de la *matriz de fallas* que garanticen la *planificación del mantenimiento preventivo* para la operación eficiente del motor trifásico de inducción, 2024.

1.5 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

1.5.1 Justificación Teórica

El motor trifásico de inducción tiene diversas componentes estructurales, las mismas que se identifican con los materiales eléctricos, magnéticos, mecánicos y dieléctricos y operativamente se relacionan con la temperatura, la vida útil y el mantenimiento.

Estas condiciones exigen que también el marco teórico debe de actualizarse en función de los nuevos materiales usados en los devanados tanto del estator como del rotor, del mismo modo la mejora de los materiales magnéticos con la utilización de mayores niveles de densidad de flujo y menores pérdidas por peso; es también importante mencionar la presencia de materiales con altos niveles de resistencia mecánica especialmente los ejes y rodamientos con

estructuras externas como la carcasa más resistentes a la intemperie y a los efectos del medio ambiente.

En tal sentido, el presente trabajo de investigación utilizara el marco teórico pertinente para describir y sistematizar las características de los materiales utilizados en la manufactura del motor trifásico de inducción con rotor de jaula de ardilla.

1.5.2 Justificación Metodológica

Los centros o departamentos de mantenimiento locales utilizan aún diversos métodos de mantenimiento y un conjunto de procedimientos basados en la experiencia, no es común la planificación del mantenimiento ni el diagnóstico que incluya una base de datos robusta con una evaluación de criticidad actualizada; en tal razón el presente trabajo desarrollara una estructura metodológica que aborde principalmente la planificación del mantenimiento sus factores y herramientas inherentes para que pueda ser parte del diseño de la matriz de fallas de las componentes estructurales del motor trifásico de inducción.

El método también considera el análisis del riesgo, constituyéndose en una herramienta significativa para construir la matriz de decisiones, de tal forma que se pueda conocer la causa, el efecto y la probabilidad de eventos adversos.

Para controlar de manera óptima los riesgos y reducirlos a un nivel aceptable se realizan algunas de las siguientes acciones:

- Identificar los riesgos potenciales asociados con los activos físicos y estimar los niveles que pueden alcanzar los riesgos asociados, analizándolos en función de los controles existentes o propuestos;
- Determinar si estos riesgos son tolerables;
- Determinar si es necesario un análisis adicional más profundo para definir si los riesgos son o no tolerables;
- Desarrollar controles de riesgo siempre que se considere necesario o deseable.

1.5.3 Justificación Técnica

La matriz de fallas aporta ventajas competitivas en la planificación del mantenimiento preventivo considerando un mejor desempeño técnico del mantenimiento, un mejor equilibrio entre el retorno, los riesgos y el incremento de la confiabilidad en la operación del motor trifásico de inducción.

Identificar cada una de las componentes del motor trifásico de inducción analizando sus funciones y detallando las partes críticas requiere de un proceso de investigación de las diferentes componentes eléctricas, magnéticas, mecánicas y dieléctricas, del mismo modo las características operativas y de mantenimiento.

Por otro lado, la mejora en los sistemas de refrigeración de las máquinas trifásicas de inducción el aumento de la calidad de los materiales magnéticos, el descubrimiento de aislantes de características especiales permiten reducir el espacio ocupado por los aislantes, lo que posibilita mayor espacio para el cobre y la densidad de corriente, en tal sentido se incrementa la potencia específica del motor, significa entonces que el mantenimiento requiere también una mejora permanente de planificación, métodos y procesos que fueron analizados en el presente trabajo.

1.6 ALCANCES Y LIMITACIONES

1.6.1 Alcances

- Los motores considerados en la investigación comprenden los motores de inducción de hasta 100 kW
- Se realizará el *análisis de planificación del mantenimiento y la matriz de fallas del motor trifásico de inducción con rotor jaula de ardilla* planteando una propuesta de solución que no contempla los siguientes estudios:
 - Coordinación de aislamiento.
 - Transitorios electromagnéticos.
 - Armónicos.

1.6.2 Limitaciones

Se presentaron las limitaciones siguientes:

- Acceso limitado a la información especializada de los centros y departamentos de mantenimiento de algunas empresas por considerarlo información clasificada y son parte del know how empresarial y se puede considerar como un activo intangible.
- Limitada utilización de instrumentos de medida y control para determinar condiciones operativas de los circuitos eléctricos, magnéticos, mecánicos y dieléctricos que permitan la comprobación experimental de los fenómenos teóricos identificados

1.7 HIPÓTESIS

1.7.1 Hipótesis general

La hipótesis que se formula para el presente proyecto es:

“La *matriz de fallas* garantiza la *planificación del mantenimiento preventivo* al establecer un marco sistemático de criticidad de las componentes estructurales para la operación eficiente del motor trifásico de inducción, 2024”.

1.7.2 *Hipótesis específicas*

- a) Los principales procesos de la planificación del mantenimiento preventivo están relacionados con el diagnóstico, organización y programación, aspectos que inciden en la operación eficiente del motor trifásico de inducción, 2024.
- b) Las etapas estructurales de la matriz de fallas son: componente crítica, los modos de fallo, causa, efecto y controles que garantizan la planificación del mantenimiento preventivo para la operación eficiente del motor trifásico de inducción, 2024.

1.8 VARIABLES E INDICADORES

Para definir las variables e indicadores se hace uso de la matriz de operacionalización, que mostramos en la *Tabla 3*.

1.8.1 *Variables*

a) **Variable Dependiente**

- Planificación del mantenimiento preventivo

Indicadores

- Diagnóstico
- Organización
- Programación

b) **Variable Independiente**

- Matriz de fallas

Indicadores

- Causa de fallo
- Efecto de fallo
- Control de fallo

1.9 METODOLOGÍA

1.9.1 *Tipo de investigación*

a) **Según el propósito u objetivo externo**

Es aplicada porque se utiliza la teoría mantenimiento de motores eléctricos trifásicos para determinar la matriz de fallas.

b) **Según el nivel u objetivo interno**

Es explicativo por que se pretende en base a estudios, explicar y analizar la relación entre la operación eficiente y mantenimiento de motores trifásicos, además que también es propositivo porque se elabora el plan de mantenimiento preventivo mediante la matriz de fallas en los motores trifásicos de inducción.

c) Según el enfoque o datos empleados

Es cuantitativo ya que busca cuantificar la reparación, mantenimiento y fallas de motores eléctricos trifásicos para desarrollar el estudio de matriz de fallas.

d) Según el Tiempo o Temporalidad

Es transversal ya que se analiza las fallas durante un intervalo de tiempo, año 2024.

1.9.2 Diseño del estudio

El diseño es no experimental porque no se manipula ninguna variable solo se observa y sistematiza la matriz de fallas que permitió el desarrollo de la planificación del mantenimiento preventivo para la operación eficiente del motor trifásico de inducción

1.9.3 Método de la investigación

Es hipotético-deductivo porque se trata de analizar la matriz de fallas a partir de experiencias y conocimientos en la etapa de reparación y mantenimiento de motores eléctricos de inducción.

1.9.4 Población y muestra

El método de muestreo es no probabilístico por conveniencia de propósito específico en la provincia de Cusco.

1.9.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

1.9.6 Técnicas

- *Recolección de documentos* como información de los responsables de centros de reparación y mantenimiento y talleres.
- *Entrevistas* a los especialistas en mantenimiento de máquinas eléctricas y diferentes entidades involucradas, entre otros.
- *Observación directa* como recolección de datos de campo en centros de reparación y mantenimiento talleres

1.9.7 Instrumentos

- Para la recolección de documentos son los *reportes y formatos* de campo de los diferentes talleres de mantenimiento.
- *Guía de entrevistas* a los diferentes encargados de talleres de mantenimiento, entre otros.
- *Guía de observación* directa o informes/reportes de campo obtenidos de la medición de instrumentos certificados y validados.

1.9.8 Confiabilidad de los instrumentos de recolección de datos

Se considera los reportes e información en formatos desarrollados por los responsables de talleres de mantenimiento, como *documentos confiables* por el hecho de que se

gestiona en base a un Plan de Operación y supervisado periódicamente, por lo cual es repetitivo en el tiempo.

Igualmente, la información obtenida en base a una guía de entrevistas planteada *repetidamente* a los diferentes responsables de talleres de mantenimiento, entre otros, será *consistente, coherente y confiable* porque ellos son conocedores directos del desempeño de los motores eléctricos trifásicos y sus fallas, constatando resultados similares en los diferentes talleres.

1.9.9 Validez de los instrumentos de recolección de datos

La información obtenida de los reportes e información en formatos desarrollados por el personal de los talleres de mantenimiento proporciona una *validez de contenido*

De la misma forma la información obtenida en base a una guía de entrevistas planteada repetidamente a los diferentes responsables de talleres de mantenimiento, entre otros, proporcionará una *validez de criterio* ya que esta información relacionará con los datos obtenidos de la medición de los instrumentos de medida

1.9.10 Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Se desarrollaron los siguientes pasos:

- a) *Recopilación de datos*: Se recopilaron datos relevantes de forma lógica y organizada para su procesamiento y análisis conforme a las técnicas e instrumentos de recopilación de datos de documentos, guías de entrevistas y reportes de observación.
- b) *Limpeza y validación de datos*: Se realiza una revisión exhaustiva de los datos obtenidos para detectar y corregir posibles errores, inconsistencias e incoherencias de los talleres de mantenimiento, valores atípicos distante con referencia a la teoría y estándares de Normas Nacionales e Internacionales de mantenimiento.
- c) *Preparación de los datos*: Se organiza y estructura los datos de diagnóstico obtenidos en los talleres de mantenimiento de las variables de Matriz de fallas para su procesamiento y análisis lo cual implica crear tablas, gráficos u otras representaciones visuales en una carpeta de datos del explorador de Windows y permitan una mejor comprensión de los datos.
- d) *Análisis de datos*: Siendo la investigación aplicada para analizar la Matriz de fallas aplicando el método hipotético – deductivo, los datos obtenidos de documentos y guías de entrevista se analizan en función de las Normas Nacionales e Internacionales.

1.10 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Se elaboró la matriz de operacionalización de variables para identificar los indicadores de la variable dependiente: “Planificación del mantenimiento preventivo” y los indicadores de la variable independiente: “Matriz de fallas”, además de la definición teórica y las correspondientes dimensiones como muestra la tabla 2.

1.11 MATRIZ DE CONSISTENCIA

La matriz de consistencia nos muestra la coherencia y alineación entre el título de la investigación con el problema identificado, la formulación del problema, los objetivos, las hipótesis, la metodología utilizada y las conclusiones.

Permite planificar y validar la estructura de la investigación, evitando contradicciones y mejorando la calidad y la claridad del estudio, se muestra en la tabla 3.

Tabla 2
Operacionalización de variables

Variable Independiente	Definición	Dimensiones	Indicadores	Instrumentos
1. <u>Planificación del mantenimiento preventivo</u> (Variable Dependiente)	La planificación de mantenimiento preventivo es un proceso estratégico que involucra la identificación, programación y ejecución de actividades para preservar o restaurar el rendimiento óptimo de equipos y sistemas. Incluye la evaluación de recursos, la priorización de tareas, la estimación de costos y la gestión del tiempo. Este enfoque sistemático busca minimizar paros no programados, prolongar la vida útil de los activos y garantizar la continuidad operativa, contribuyendo así a la eficiencia y confiabilidad de las operaciones (scielo)	• Sistema • Recursos • Activos	• Diagnóstico • Organización • programación	• Aplicación de encuestas a los técnicos y profesionales de talleres y centros de mantenimiento. • Entrevista con responsables o encargados de talleres o centros de mantenimiento
2. <u>Matriz de fallas</u> (Variable Independiente)	Una matriz de fallas es una herramienta sistemática utilizada en la gestión de riesgos y mantenimiento para identificar, clasificar y analizar posibles fallas en sistemas o equipos. Organiza las posibles fallas en filas y columnas, permitiendo evaluar la probabilidad y consecuencias de cada evento. Esta representación visual facilita la toma de decisiones al priorizar acciones preventivas o correctivas, mejorando así la eficiencia y confiabilidad de los procesos o equipos. (Scielo)	• Gestión de riesgos • Confiabilidad	• Modo de fallo • Causa de fallo • Efecto de fallo • Control de fallo	• Apoyo con la Norma Técnica de motores DIN 42673 • Simulación y Diagnostico adecuado de motores.

Tabla 3:*Matriz de consistencia*

TEMA DE TESIS: “Planificación del mantenimiento preventivo para operación eficiente mediante la matriz de fallas del motor trifásico de inducción, 2024						
Planteamiento del problema	Formulación del problema	Objetivos	Hipótesis	Variables e Indicadores	Instrumentos	Metodología de investigación
El presente proyecto de investigación analiza la planificación del mantenimiento de los motores trifásicos de inducción en su contexto de operación eficiente referente al diagnóstico, organización y programación. Por otra parte, con la finalidad de evaluar las fallas frecuentes e integrales se procesará la matriz de criticidad y para determinar las causas comunes de desperfectos se elaborará la matriz de fallas como un método de solución al mantenimiento preventivo de las componentes estructurales sean estas del circuito eléctrico, magnético, mecánico, dieléctrico o térmico del motor trifásico de inducción de rotor de jaula de ardilla, debido a que esta matriz puede reducir o marcar la diferencia entre los tiempos de inactividad con su correspondiente lucro cesante y un mayor tiempo de funcionamiento ininterrumpido de la máquina eléctrica.	Pregunta general objeto de investigación	Objetivo General	Hipótesis General	a) Variables Dependiente - Planificación del mantenimiento preventivo. Indicadores - Diagnóstico - Organización - programación b) Variable Independiente - Matriz de fallas Indicadores - Modo de fallo - Causa de fallo - Efecto de fallo - Control de fallo	- Ficha de reporte. - Formato de salida y reingreso de materiales - Norma Técnica - Ficha Técnico-Comercial de atención al cliente. - Encuesta y entrevista	•Tipo de investigación según propósito La presente es una investigación del tipo aplicada . •Tipo de investigación según el Nivel La presente investigación tiene el nivel explicativo . •Tipo de investigación según el diseño El diseño de la investigación que se utiliza es cuasi-experimental .
	¿De qué manera la matriz de fallas garantiza la planificación del mantenimiento preventivo para la operación eficiente del motor trifásico de inducción, 2024?	Desarrollar el plan de mantenimiento preventivo para la operación eficiente del motor trifásico de inducción mediante la sistematización de la matriz de fallas y de criticidad, 2024	La matriz de fallas garantiza la planificación del mantenimiento preventivo al establecer un marco sistemático de criticidad de las componentes estructurales para la operación eficiente del motor trifásico de inducción, 2024. .			
	Preguntas específicas	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicas			
	a) ¿Cuáles son los principales procesos de la planificación del mantenimiento preventivo para la operación eficiente del motor trifásico de inducción, 2024? b) ¿Cuáles son las etapas estructurales de la matriz de fallas que garantizan la planificación del mantenimiento preventivo para la operación eficiente del motor trifásico de inducción, 2024?	a) Analizar los principales procesos de la planificación del mantenimiento preventivo para la operación eficiente del motor trifásico de inducción, 2024 b) Analizar las etapas estructurales de la matriz de fallas que garantizan la planificación del mantenimiento preventivo para la operación eficiente del motor trifásico de inducción, 2024.	Los principales procesos de la planificación del mantenimiento preventivo están relacionados con el diagnóstico, organización y programación, aspectos que inciden en la operación eficiente del motor trifásico de inducción, 2024. b) Las etapas estructurales de la matriz de fallas son: componente crítica, los modos de fallo, causa, efecto y controles que garantizan la planificación del mantenimiento preventivo para la operación eficiente del motor trifásico de inducción, 2024.			

CAPÍTULO II

EL MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

2.1 Antecedentes

Como antecedentes del estudio se tiene los siguientes trabajos de investigación:

- Tesis de grado, “*Análisis experimental de la función de transferencia de la máquina de inducción trifásica operando como generador*”, tesis realizada por Mario Alberto Juro Ferrel (Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco) – 2013. Este trabajo de tesis se logró analizar en forma teórica y también experimental las relaciones entre las variables y parámetros del Generador de Inducción Auto excitado, principalmente las variables de salida fundamentalmente la tensión en vacío y con carga (V_i), corriente de carga (I_L), la frecuencia (F). Del mismo modo analiza la función de transferencia en el sistema y subsistemas principales, identificando las señales input y output. Logra establecer el modelo de la máquina de inducción, describiendo el principio de funcionamiento y las ecuaciones de equilibrio eléctrico y mecánico, (Resumen). [4]
- Tesis de grado, “*Análisis de rentabilidad de la actividad eléctrica: caso reparación y mantenimiento de motores eléctricos en la ciudad del Cusco*”, tesis realizada por David Aparicio Lenin (Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco) – 2017. En esta tesis se muestra que la actividad económica de reparación y mantenimiento de motores en la ciudad del Cusco muestra indicadores de rentabilidad para las microempresas donde el propietario es el único trabajador es de $B/C=1.062$, en cambio para aquellas microempresas donde cuentan hasta con 10 trabajadores su rentabilidad es de $B/C=1.06$ y para aquellas microempresas donde el número de trabajadores es mayor a 10 personas el índice de rentabilidad es de $B/C=1.074$, todos estos resultados indica que esta actividad es rentable (Resumen). [1]
- Tesis de grado, “*Optimización del mantenimiento preventivo a motores de rotor devanado de 3600 kw, con 6600 volts, que mueven molinos de cemento con capacidad de 120 toneladas por hora*”, tesis realizada por Luis Manuel Hernández Ángeles (Instituto Politécnico Nacional - Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, México, D.F.) – 2009. En este trabajo de investigación se propone la

aplicación correcta de los sistemas que permite lograr porcentaje muy alto de éxito. Otro punto importante es el seguimiento a los planes de mantenimiento implementados, ya que, si solo se desarrollan y se dejan de hacer mejoras, con el tiempo se volverán obsoletos y seguramente tendremos problemas imprevistos. Un buen presupuesto anual para el servicio, mantenimiento y cambio de refacciones de desgaste debe complementar los planes de mantenimiento, ya que si no se tienen las refacciones en tiempo adecuado podemos tener problemas. Se concuerda que el mantenimiento está en permanente cambio debido a que las máquinas eléctricas y los materiales de los que están manufacturados también están expuestos a continuas mejoras, en consecuencia, los planes de mantenimiento serán dinámicos concordantes con la mejora continua (Resumen). [5]

- Tesis de grado, *“Estudio para un programa de mantenimiento preventivo para reducir el elevado nivel de paradas imprevista en los motores eléctricos del departamento de Tosti3n en la empresa Gusnobe S.A”*, tesis Ítalo Willian Ponce Villavicencio (Universidad Estatal de Milagro - Ecuador), 2013, en su estudio contempla pretende conocer diversos factores de riesgos que afectan a la producci3n y adquirir la informaci3n necesaria la cual ayudará en el planteamiento de un programa de mantenimiento preventivo, con la finalidad de reducir el nivel de paras de los motores eléctricos de la misma área, también cumple con las necesidades de un formato para la elaboraci3n de un plan de mantenimiento, una orden de trabajo y una hoja de inspecci3n que permitirá establecer los registros diarios, semanales, mensuales y anuales que se dará a conocer al departamento de producci3n de la empresa. El presente estudio de un programa de mantenimiento preventivo, se convertirá en una herramienta esencial para la empresa y el área Tosti3n ya que tendrá algunos puntos de determinaci3n de varios problemas que se encuentran dentro del mismo como es la elaboraci3n del plan de mantenimiento y los formatos de trabajo antes mencionados que llevará al análisis y conclusi3n de los problemas que se presentaran por los diversos factores que afectan al rendimiento de los motores del área de Tosti3n de la empresa de producci3n de café de la provincia del Guayas, cant3n el Triunfo, en el Km. 28 ½ vía al Triunfo (Resumen). [6]
- Artículo IEEE DOI: 10.1109/PICC57976.2023.10142469, *“Broken Rotor Bar Fault in 3- Φ Squirrel-Cage Induction Motors: A Critical Observations”*, publicaci3n realizado por SSSR Sarathbabu Duvvuri, Swaroop KP, Sagiraju Dileep Kumar

Vamar, Sandeep Gogula (Department of Electrical & Electronics Engineering, Shri Vishnu Engineering College for Women - India), 2023, En este manuscrito se presenta un análisis crítico sobre la falla de la barra del rotor rota en un motor de inducción trifásico. La investigación principal se lleva a cabo sobre la detección y el diagnóstico de fallos de barras rotas basados en modelos para motores de inducción. En la literatura se encuentra disponible una amplia variedad de modelos de motores de inducción defectuosos. De los cuales, los marcos de referencia basados en modelos de motores de inducción se utilizan ampliamente en el diagnóstico de fallas. Se cree que es una contribución novedosa, ya que los investigadores no han considerado si estos modelos defectuosos se comportan de manera similar en sistemas de referencia estacionarios, de rotor, sincrónicos y arbitrarios. Como extensión, en este manuscrito se propone un modelo de motor de inducción de rotor roto recientemente modificado. Para validar la idea propuesta, se realizan cálculos dinámicos de modelos utilizando el software de programación MATLAB R2022a. La novedosa idea se verifica mediante extensos estudios de simulación con varios motores de inducción (P.1). [7]

- Artículo IRJ ETS, “*Study of optimization of squirrel cage induction motor using dcr technique*”, publicación realizada por Santosh Kumar Vishwakarma, Vartika Keshri (University, Bhopal, India), 2023, En este manuscrito se desarrolla que los motores eléctricos no transfieren el 100% de la energía eléctrica de entrada en energía mecánica cinética. Un porcentaje de energía eléctrica se pierde durante la conversión en energía mecánica. Estas pérdidas se producen en los devanados del motor, el núcleo y las piezas mecánicas giratorias y disminuyen la eficiencia energética de los motores. Hoy en día se está creando una situación de crisis energética, es muy importante fabricar motores que sean más eficientes que los motores estándar que ya están disponibles. El motor de inducción de CA mejora continuamente optimizando el diseño del estator y del rotor con el devanado y el mejor material utilizado para las propiedades de la corriente eléctrica. Cuando se utilizan determinadas dimensiones exteriores e interiores del motor, la ganancia potencial de eficiencia es limitada y costosa. La tecnología DCR (Resistencia de corriente directa) es un nuevo invento para disminuir las pérdidas mediante el uso de devanados de cobre en lugar de aluminio para las barras conductoras y los anillos finales de los rotores para mejorar su eficiencia y rendimiento (P.1). [8]

- Artículo Springer Link DOI: 10.1007/s00202-020-00955-2, “*Comparative analysis of line-start permanent magnet synchronous motor and squirrel cage induction motor under customary power quality indices*”, publicación realizado por P. Sethupathi, N. Senthilnathan (Department of Electrical and Electronics Engineering, Kongu Engineering College, India), 2023, En este manuscrito se desarrolla que el motor síncrono de imán permanente de arranque en línea (LSPMSM) de eficiencia súper premium (IE4) es una de las buenas alternativas al motor de inducción de jaula de ardilla (SCIM), especialmente para una aplicación de arranque en línea. Los parámetros de rendimiento del motor como la eficiencia, el consumo de energía de entrada, el factor de potencia, el comportamiento de arranque y la ondulación del par se ven afectados principalmente debido a los índices de calidad de energía habituales. Los problemas se originan debido a hornos, convertidores electrónicos de potencia, cargas no lineales, controladores digitales, equipos eléctricos modernos y variaciones intensas de carga. Por tanto, el análisis del rendimiento de LSPMSM y SCIM es esencial para comprender el comportamiento motor. En este estudio se consideran la distorsión armónica de voltaje, el factor de desequilibrio de voltaje y la variación de voltaje de larga duración. Los índices habituales de calidad de la energía (CPQI) se recopilan utilizando un analizador de potencia y energía en una industria azucarera en varios puntos medidos. En el presente estudio, se diseña y crea un prototipo de LSPMSM de 2,2 kW para funcionamiento con carga constante. El motor diseñado y el SCIM se utilizan para analizar el rendimiento mediante análisis de elementos finitos bajo la influencia del CPQI medido y los efectos sobre sus parámetros de rendimiento individuales (P.1). [9]

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Motores eléctricos y el mantenimiento

El artículo especializado escrito por Antonio Frieser, DataScope, respecto a los Motores eléctricos y las claves para un correcto mantenimiento dice lo siguiente:

Los motores eléctricos son parte importante del equipamiento de una empresa. Se usan con fines industriales, comerciales y residenciales, y permiten el funcionamiento de trenes, automóviles, compresores, sistemas de bombeo, entre otros. Sin importar la industria, este tipo de propulsores juega un papel clave para la productividad, así como su mantenimiento.

En su afán de mantener su operatividad sin interrupciones, el mantenimiento debe realizarse constantemente y de manera planificada para evitar problemas futuros. Aunque

se puede interpretar que el funcionamiento de un motor eléctrico puede ser tan o más sencillo que uno de combustión interna, un mantenimiento deficiente es una condena para ese tipo de motores, ya que difícilmente pueden volver a su estado original, a menos que se reemplacen casi todos sus componentes internos, lo que fácilmente nos lleva a concluir que el costo de una avería no es algo menor.

Por eso, la clave es buscar que los motores eléctricos entreguen su máximo potencial, por el mayor tiempo posible. Y para eso se necesita realizar una planificación estratégica del mantenimiento

Claves para proteger un motor eléctrico

La conservación de los motores eléctricos es un aspecto fundamental para las empresas, dada su condición de uso continuo. Por esa razón, se deben cubrir tanto los componentes eléctricos como mecánicos que están expuestos al desgaste y contaminación con elementos externos.

Componentes eléctricos como bobinados o escobillas necesitan un mantenimiento y mediciones periódicas donde se realice una revisión de conexiones, reemplazo de piezas con desgaste.

Existe una serie de instrumentos que son imprescindibles para el trabajo de mantenimiento de motores eléctricos, entre ellos megóhmetro, micro ohmímetro, multímetro y osciloscopio. Gracias a ellos, es posible obtener valores de aislamiento, continuidad, frecuencia, corriente, voltaje, potencia y formas de onda.

A su vez, rodamientos, ejes, carcasas y otros componentes mecánicos de los motores eléctricos, deben ser sometidos a una pauta de mantenimiento que considere limpieza, anclajes de las piezas y medidas que permitan evaluar la velocidad, el equilibrio del rotor, el par aplicado por la carga y la temperatura.

Qué mantenimiento realizar

Existen dos caminos a la hora de optar por el mantenimiento de cualquier motor eléctrico. Sea preventivo o correctivo, ambos buscan garantizar un correcto funcionamiento, evitando o reparando averías y extendiendo al máximo su vida útil. Sin embargo, existen diferencias entre uno y otro.

- El mantenimiento preventivo, como su nombre lo indica, se realiza de manera periódica y su objetivo es prevenir averías que interrumpan la operación del motor. Se debe realizar de manera planificada, verificando el funcionamiento y realizando procedimientos de

ajustes, lubricación, revisión y reposición de piezas, siguiendo las recomendaciones del fabricante en función de la carga de trabajo del motor.

- La opción del mantenimiento correctivo entra en acción cuando se produce una falla en el motor que interrumpe su funcionamiento o provoca daños que impiden su plena operatividad. Dada su naturaleza impredecible, es importante minimizar su efecto. Para lograrlo, es fundamental contar con los repuestos necesarios para su reparación y tener personal calificado para ejecutar el trabajo en el menor tiempo posible.
- Cuando se trata de motores eléctricos, es recomendable priorizar el mantenimiento predictivo por sobre el correctivo. Primero porque al realizar revisiones periódicas se reduce el margen de posibles fallas y se asegura que funcionen siempre al máximo de sus capacidades. Y, por último, porque cuando un motor eléctrico comienza a fallar, es demasiado tarde” (Frieser, 2020)

Antonio Frieser, continúa su análisis de la Planificación del Mantenimiento como factor clave para el éxito de una empresa con los siguientes conceptos:

El Planificador de mantenimiento.

Dentro del área de planificación de una empresa, existe una serie de tareas críticas que deben ser ejecutadas minuciosamente para lograr el cumplimiento de sus objetivos. Una de ellas es la que corresponde al planificador de mantenimiento.

La función principal del planificador de mantenimiento es determinar las tareas que se deben ejecutar, definir el momento en que deben llevarse a cabo y de qué manera deben hacerse.

De un modo general, el planificador de mantenimiento se encarga de:

- Desarrollar un plan de mantención.
- Actualizar la información técnica de los equipos, las especificaciones y el listado de repuestos.
- Establecer y mantener un canal fluido de comunicación con áreas de producción, operadores y supervisores.
- Manejar el volumen del backlog de mantenimiento.
- Enfocar los esfuerzos del equipo para reducir el tiempo no productivo.

Factores de riesgo para la gestión del planificador de mantenimiento

Las funciones de un planificador de mantenimiento pueden verse condicionadas por el tamaño de la empresa en cuestión, las necesidades del equipo de trabajo, la estrategia

trazada por la compañía y por factores de la cultura organizacional en materia de división y distribución de las tareas que se deben cumplir.

Sin embargo, no es posible determinar un modelo aplicable para todos los profesionales que se desempeñan en ese cargo. Por esa razón, y para evitar dudas sobre qué tareas son responsabilidad de un planificador de mantenimiento, es necesario establecer criterios que ayuden a definir concretamente su campo de acción.

¿Cómo definir el trabajo del planificador de mantenimiento?

Un profesional dedicado a planificar el mantenimiento en una empresa debe responder a tres áreas de acción interrelacionadas entre sí que apuntan a tener un conocimiento total de los recursos:

- El manejo de la ejecución de tareas
- El equipo involucrado en la operación
- La medición de resultados y rendición de cuentas.

Las áreas que mencionamos y sus particularidades son las siguientes:

Levantamiento de información

- Analizar los activos – se trata básicamente de conocer los equipos que están a su disposición, considerando su materialidad, recomendaciones de los fabricantes y detalles de su funcionamiento.
- Realizar un diagnóstico aplicando un AMEF – al momento de diagnosticar una falla, el planificador de mantenimiento tiene que ser capaz de analizar un conjunto de indicadores clave. Idealmente debe ser posible, además, lograr un nivel de detectabilidad. Para llegar a resultados óptimos, lo recomendable es realizar este tipo de diagnóstico usando el Método de Análisis del Modo y Efecto de Fallas (AMEF).
- Procesar la información – los datos recopilados deben ser organizados y almacenados para que el planificador de mantenimiento sea capaz de determinar qué hacer y cuál es la mejor forma de llevar a cabo el trabajo.

Ejecución y control del trabajo

- Diseñar instrucciones – concluido el levantamiento de información, la siguiente área de acción es definir las pautas de trabajo, orientando a cada trabajador sobre los procedimientos que deben realizar.
- Equilibrar tareas y metas – El planificador de mantenimiento debe establecer una relación entre las tareas de mantenimiento y las metas de producción. La clave es articular las necesidades de ambos departamentos, generando un canal de intercambio

de información mutua que garantice un impecable funcionamiento de la operatividad de los activos físicos, en línea con las metas de la empresa.

-Programar el mantenimiento – Una vez definido lo anterior, es necesario planificar cuándo llevar a cabo las mantenciones. Y eso solo es posible cuando se conocen las condiciones de los activos físicos y las ventanas de tiempo disponibles.

-Manejo del equipo de trabajo – El responsable por la planificación de mantenimiento también debe tener dominio sobre quienes ejecutarán las tareas que él diseña y asigna. Eso le permitirá definir a quién encomendar cada labor, una vez que evalúe el desempeño, conocimiento y experiencia de cada trabajador, organizando además y dirigiendo al equipo.

-Suministrar materiales de trabajo – En su faceta de facilitador, el planificador de mantenimiento debe calcular la cantidad de material necesario para la ejecución de cada tarea y solicitar la adquisición de ellos anticipadamente.

-Relación con contratistas – Es frecuente la necesidad de contar con personal externo para realizar tareas. Por esa razón, se requiere la capacidad de planificación y gestión de ese apoyo, considerando tiempos, integración con el equipo de planta y alineamiento con los estándares y objetivos de la empresa para una ejecución eficiente.

Medición de resultados y rendición de cuentas

-Generación de informes – En su rol de unir a la gerencia con el área técnica, existe una gran cantidad de datos sobre el trabajo realizado, los cuales deben ser reunidos y organizados para después elaborar informes que llegan a las manos de los gerentes, quienes evalúan el desempeño junto con el resto del equipo.

El apoyo de los CMMS o Apps de mantenimiento (Sistema de Gestión de Mantenimiento Computarizado

A lo largo de las áreas relacionadas con el trabajo de un planificador de mantenimiento, el manejo de un enorme volumen de datos e información crítica es permanente.

Por esa razón, existen soluciones tecnológicas, conocidas como CMMS (Sistema de Gestión de Mantenimiento Computarizado) por sus siglas en inglés. Se trata de un software que puede ser diseñado según los requerimientos específicos del cliente y apoya al planificador de mantenimiento para que su labor sea lo más eficiente posible. Dentro de las posibilidades que ofrece el desarrollo de este tipo de herramientas está la capacidad de:

- Reunir y organizar información crítica que ayude al gerente, a los técnicos y al planificador de mantenimiento a conocer detalladamente los activos.
 - Emitir órdenes de trabajo que incorporen esa información, ofreciendo la mayor claridad y datos relevantes al equipo técnico en terreno para que ejecute su labor.
 - Contar con la opción de diagnosticar equipos no automatizados o poco prioritarios a través de una orden de trabajo, o recurrir a soluciones que incluyen IoT cuando se trate de un diagnóstico de equipos automáticos.
 - Automatizar órdenes de trabajo que permitan asignar responsables y agregar indicaciones precisas sobre procedimientos, garantías, herramientas, piezas, materiales, entre otras para la ejecución del trabajo.
 - Incorporar los protocolos de seguridad a las órdenes de trabajo, ayudando al planificador de mantenimiento entregar a los técnicos toda la información y procedimientos de seguridad pertinentes, además de garantizar el cumplimiento y revisión del trabajo a través de la aplicación.
 - Programación de tareas, permitiendo al planificador de mantenimiento anticipar y poner a disposición del equipo los recursos necesarios, considerando los objetivos trazados y los tiempos de entrega comprometidos.
 - Control de herramientas para determinar materiales, herramientas, piezas y equipo de seguridad laboral que se debe asignar al momento de emitir al equipo una orden de trabajo.
 - Administrar equipos de trabajo, independiente de si son pertenecientes a la empresa o externos, asignando el trabajo según el tipo de activo, experiencia u otros criterios.
 - Elaboración de informes en tiempo real, que permiten dar cuenta del trabajo y presentar a la gerencia la información relacionada con todo el proceso contenido en una orden de trabajo, constituyéndose en un aporte para la toma de decisiones de la empresa.
 - Crear todo tipo de notificaciones automáticas que alerten al equipo de trabajo sobre la ocurrencia de fallas en tiempo real y fechas críticas, como la ejecución de tareas, caducidad de garantías o inspecciones rutinarias.
- Visualización de KPI's claves que permiten tanto a la gerencia como al planificador de mantenimiento medir el desempeño de toda la operación, a través datos y estadísticas de todos los aspectos críticos relacionados con la mantención.
- Digitaliza las Órdenes de Servicios utilizando una App inteligente para las tareas de Instalación y mantenimiento (Frieser, 2020).

2.2.2 Análisis de criticidad en máquinas eléctricas

En opinión de Edwin Gutierrez, Miguel Agüero e Ivaneska Calixto, el “Análisis de Criticidad Integral de Activos” (Predictiva 21) tiene las características siguientes:

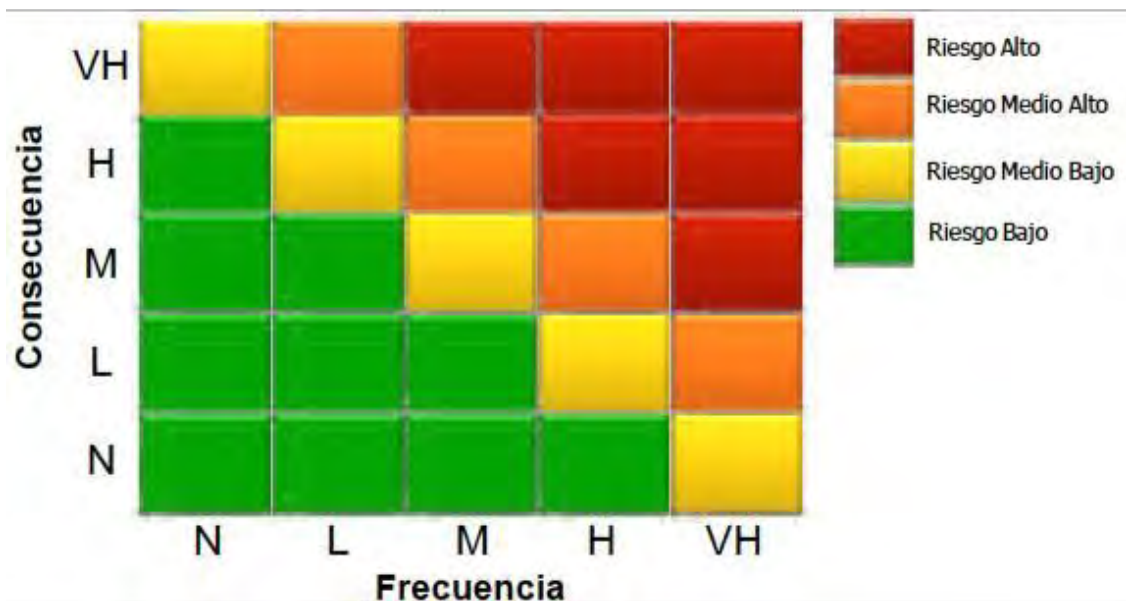
Hoy en día el ambiente competitivo de las empresas de mantenimiento está caracterizado por una serie de fuerzas que han obligado a las compañías a cambiar su forma tradicional de desarrollar sus operaciones. Es importante que las empresas se esfuercen a adaptarse cada vez más rápidamente a realidades nuevas y complejas. La rapidez de los cambios en este ambiente de negocio ha obligado a las organizaciones a invertir y tomar decisiones basadas en información incompleta, incierta o imprecisa y al mismo tiempo, a cumplir con las exigencias de producir a menor costo y con mayores niveles de calidad y confiabilidad.

Durante muchos años las empresas se limitaron al diseño de sus planes de mantenimiento pensado en las recomendaciones de los fabricantes, con base a las fallas ocurridas y en la experiencia operacional interna y externa. Adicionalmente se divorciaba al operador de las actividades de mantenimiento de los equipos. Esta práctica ha generado una visión truncada de los requerimientos reales de mantenimientos de los activos y sin considerar los niveles de riesgo asociados a SHA (Seguridad, Higiene y Ambiente) y su impacto en Procesos, así como también la condición de los Equipos Estáticos para la selección de las estrategias de inspección y frecuencias (predictiva 21).

A. Análisis de criticidad

Es una metodología que permite establecer la jerarquía o prioridades de instalaciones, sistemas, equipos y dispositivos, de acuerdo con una figura de mérito llamada “Criticidad”; que es proporcional al “Riesgo” creando una estructura que facilita la toma de decisiones y el direccionamiento del esfuerzo y los recursos hacia las áreas, de acuerdo con su impacto en el negocio.

El análisis de criticidad es una técnica de fácil manejo y comprensión en el cual se establecen rangos relativos para representar las probabilidades y/o frecuencias de ocurrencia de eventos y sus consecuencias. Ambas magnitudes, frecuencias y consecuencias, se registran en una matriz, diseñada en base a un código de colores que denotan la menor o mayor intensidad del riesgo relacionado con la Instalación, Sistema, Equipo o Dispositivo (ISED) bajo análisis, tal como se ilustra en la **Figura 3**.

Figura 3*Niveles de riesgo en la criticidad*

Nota: Gráfica de Gutierrez, et al., 2021. “Análisis de Criticidad Integral de Activos” (Predictiva 21), donde el color rojo es de alto riesgo y el verde significa un bajo riesgo.

Los productos del Análisis de Criticidad son:

- Lista jerarquizada por “criticidad” de los ISED’s (instalaciones, sistemas, equipos o dispositivos) bajo análisis.
- Matriz de criticidad con la calificación del riesgo asociado a cada ISED analizado.

B.- Definición de riesgo

El riesgo es un término de naturaleza probabilística, que se define como “egresos o pérdidas probables consecuencia de la probable ocurrencia de un evento no deseado o falla”. En este simple pero poderoso concepto coexiste la posibilidad de que un evento o aseveración se haga realidad o se satisfaga, con las consecuencias de que ello ocurra.

Matemáticamente el riesgo asociado a una decisión o evento viene dado por la expresión universal:

$$R(t) = P(t) \times C(t) \quad (1)$$

Donde:

R(t): Riesgo

P(t): Probabilidad

C(t): Consecuencias

Al momento de evaluar un particular evento o aseveración en particular, es necesario cuantificar las probabilidades de ocurrencia y consecuencias de cada uno de los escenarios que conllevan al evento bajo estudio.

En ese proceso de toma de decisiones se emplea el riesgo como una herramienta para la optimización de los planes de cuidado de activos, dirigiendo mayores recursos y esfuerzos para aquellos equipos que presente un riesgo elevado y una reducción de esfuerzo y recursos para los equipos de bajo riesgo, lo cual permite en forma general un gasto justificado en los recursos dirigidos a las partidas de mantenimiento.

C.- Técnicas de análisis de riesgo

Existen diferentes técnicas para dimensionar el riesgo, todas ellas enmarcadas en tres modalidades técnicas “Cualitativas”, “Semi-Cuantitativas” y técnicas “Cuantitativas”.

D.- Técnicas cualitativas:

Las técnicas cualitativas como su nombre lo indica, obedecen a razonamiento de naturaleza cualitativa, donde la estimación de la probabilidad de ocurrencia de los eventos y de sus respectivas consecuencias se realiza utilizando una escala relativa donde no se establecen rangos numéricos explícitos. Universidad Rafael Bellosó Chacín, “Técnicas cualitativas de análisis de riesgo” (s.f).

La estimación del riesgo pasa por estimar la probabilidad de ocurrencia de un evento (frecuencia de ocurrencia) y sus consecuencias. Las técnicas cualitativas, proponen estimar ambos términos, calificándolos como se muestra a continuación:

Estimación cualitativa de la frecuencia

- 1.- Extremadamente improbable.
- 2.- Improbable.
- 3.- Algo probable.
- 4.- Probable.
- 5.- Muy probable.

Estimación cualitativa de consecuencias

- A.- No severa.
- B.- Poco severas.
- C.- Medianamente severas.
- D.- Muy severas.
- E.- Extremadamente severas.

Una vez que las probabilidades de cada evento han sido estimadas conforme a la escala relativa descrita anteriormente; y por otra parte, las consecuencias han sido categorizadas dependiendo de su severidad relativa, se puede estimar cualitativamente el riesgo asociado a cada escenario considerado y agrupar los escenarios en diferentes grupos donde las probabilidades y consecuencias sean equivalentes.

Una de las debilidades de esta técnica, es que, debido a su naturaleza cualitativa, en ciertas ocasiones y dependiendo de la percepción de los analistas, un mismo evento podría ser categorizado en diferentes escalas; de allí la importancia de establecer cierto esquema referencial para definir en forma más explícita los diferentes niveles de probabilidades y consecuencias, y por otra parte conservar el mismo equipo de trabajo durante todo el desarrollo del análisis de riesgo.

Técnicas Semi- Cuantitativas

Al igual que las técnicas cualitativas, son técnicas blandas, de fácil manejo y comprensión, cuya mayor virtud es la de proveer un valor de criticidad, proporcional al riesgo, que permite jerarquizar opciones para tomar una decisión, componentes dentro de un sistema, equipos o subsistemas en una instalación, etc., pero que por su carácter semi-cuantitativo no permiten obtener valores absolutos de riesgo y por ende no son las más adecuadas para establecer la tolerabilidad del riesgo.

En las técnicas semi-cuantitativas, se establecen rangos relativos para representar las probabilidades de ocurrencia y las consecuencias correspondientes, llegándose a establecer una matriz de criticidad o de jerarquización del riesgo, que, si bien no corresponde a valores absolutos, si representan rangos numéricos de riesgo.

Posteriormente, una vez cuantificadas (al menos comparativamente) las probabilidades de ocurrencia y las respectivas consecuencias, se procede a estimar en forma relativa el riesgo.

E.- Técnicas Cuantitativas

Para realizar un dimensionamiento más objetivo del Riesgo, que permita juzgar sobre bases más sólidas su tolerabilidad, existe técnicas cuantitativas, mucho más complejas que las técnicas cualitativas y semi cuantitativas y que por ende requieren mayor tiempo para su desarrollo.

Las técnicas cuantitativas permiten determinar valores absolutos de riesgo, que pueden tratarse como egresos probables y por ende incluirse en evaluaciones financieras a ser tomados en consideración en cualquier proceso de toma de decisiones. El objetivo principal es determinar el riesgo asociado a un evento, escenario o decisión en particular a través de la

cuantificación explícita de la probabilidad y las consecuencias, como se muestra en la Figura 4.

Figura 4

Diagrama de Riesgos, Probabilidad de fallas y Consecuencias



Nota: Gráfica capturada de Gutiérrez, et al., 2021. “Análisis de Criticidad Integral de Activos” Predictiva 21.

2.2.3 Fundamentos del Análisis de Criticidad

El Análisis de Criticidad (AC) es una metodología “semi-cuantitativa” para dimensionar el riesgo que permite establecer jerarquías o prioridades de instalaciones, sistemas, equipos y dispositivos (ISED’S), de acuerdo con una figura de mérito llamada “Criticidad”; que es proporcional al “Riesgo”: La Criticidad se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\text{CRITICIDAD} = \text{Frecuencia de Falla} \times \text{Impacto}$$

La cual es proporcional a la siguiente ecuación:

$$\text{RIESGO} = \text{Prob. Falla} \times \text{Consecuencia}$$

La Frecuencia de Falla es proporcional a la probabilidad de falla y el Impacto es proporcional a la Consecuencia de una falla; en consecuencia; CRITICIDAD es Proporcional al RIESGO.

El análisis de criticidad es una técnica de fácil manejo y comprensión en el cual se establecen rangos relativos para representar las probabilidades y/o frecuencias de ocurrencia de eventos y sus impactos o consecuencias. Ambas magnitudes; frecuencias e impactos; se llevan entonces a una matriz; como la mostrada en la Figura 5 que tiene un código de colores que denotan la

menor o mayor intensidad del riesgo relacionado con la instalación, sistema, equipo o dispositivo bajo análisis.

Figura 5

Matriz de criticidad

		Frecuencia					
		Común	Ha sucedido	Podría suceder	Raro que suceda	Prácticamente imposible que suceda	
		A	B	C	D	E	
Severidad	Catastrófico	1	A	A	A	A	M
	Mortalidad	2	A	A	A	M	B
	Permanente	3	A	M	M	B	B
	Temporal	4	M	M	B	B	B
	Menor	5	M	B	B	B	B

Nota: Gráfica capturada de Gutiérrez, et al., 2021. “Análisis de Criticidad Integral de Activos”

La Figura 5 muestra un típico arreglo de una matriz de riesgo 5×5 semicuantitativa; Puede verse en la figura que el eje de la probabilidad o frecuencia se divide en rangos calificados como Alto, Medio, Bajo y Remoto; y de igual manera se dividen las consecuencias en rangos calificados como Grave; Substantial, Marginal e Insignificante. Estos rangos deben asociarse a valores numéricos para estudios cuantitativos y/o a descripciones muy claras para el caso de estudios semi-cuantitativos o cualitativos.

En la matriz pueden identificarse tres regiones; a saber:

- Región de Riesgo Inaceptable (rojo)
- Una región entre las regiones de riesgo aceptable y riesgo inaceptable en la cual se requiere de acciones de evaluación detallada, gerencia y monitoreo del riesgo” (amarillo)
- Región de Riesgo Aceptable (verde)” (Gutiérrez, 2020)

2.2.4 La máquina trifásica de inducción

La máquina de inducción es concebida principalmente como motor asíncrono, esta máquina fue creado es su forma más simple por Galileo Ferraris y Nikola Tesla en 1885-86. Dos años

más tarde se construyó una máquina con el rotor en forma de jaula de ardilla, el rotor de bobinado se desarrolló a principio del Siglo XX.

La diferencia del motor asíncrono con el resto de los motores eléctricos radica en el hecho de que no existe corriente conducida a uno de sus devanados (normalmente al rotor jaula de ardilla).

La corriente que circula por el devanado del rotor se debe a la fuerza electromotriz inducida en él por el campo giratorio producido por los devanados del estator; por esta razón, a este tipo de motores se les designa también como motores de inducción.

La denominación de motores asíncronos obedece a que la velocidad de giro del motor no es la de sincronismo y es impuesta por la frecuencia de la red.

Hoy en día se puede decir que más del 80% de los motores eléctricos utilizados en la industria son de este tipo, trabajando en general a velocidad prácticamente constante. No obstante, y gracias al desarrollo de la electrónica de potencia (inversores y ciclo convertidores), en los últimos años está aumentando considerablemente la utilización de este tipo de motores a velocidad variable.

La gran utilización de los motores trifásicos de inducción se debe a las siguientes causas: construcción simple, bajo peso, mínimo volumen, bajo coste y mantenimiento inferior al de cualquier otro tipo de motor eléctrico.

Hay dos tipos básicos de motores trifásicos de inducción:

- Motores de jaula de ardilla: donde el devanado del rotor está formado por barras paralelas entre sí y al eje, son fabricados de cobre o aluminio, los extremos del mismo están puestos en cortocircuito por dos anillos extremos a los cuales se unen por medio de soldadura o fundición.
- Motor de rotor bobinado: el devanado del rotor de estos motores está formado por un bobinado trifásico con características similares al del estator, con igual número de polos.

Un motor de rotor bobinado a igualdad de potencia y clase de protección es más costoso, menos robusto y exige un mantenimiento mayor que uno de jaula de ardilla. No obstante, frente a este último posee fundamentalmente dos ventajas, que en algunos casos concretos resultan determinantes: las características del circuito eléctrico del rotor pueden ser modificadas en cada instante desde el exterior, y la tensión e intensidad del rotor son directamente accesibles a la medida o al control electrónico.

A. Características constructivas de la Máquina de Inducción

La Máquina de inducción o llamada máquina asíncrona operando como motor es generalmente trifásico, en la actualidad el uso como motor eléctrico es el más utilizado en las aplicaciones industriales, sobre todo con rotor de jaula de ardilla.

Esta máquina es usada en una amplia variedad de aplicaciones basadas en la conversión de energía eléctrica a trabajo mecánico. Es sin duda el referente en la industria eléctrica, bombeo, fundición de acero, control de grúas, máquinas herramienta, servomotores y un sin número de aparatos electrodomésticos.

La figura 6 muestra las componentes principales del motor de inducción trifásica como son: la cubierta frontal o tapa delantera, el rodamiento o cojinete anterior y posterior, el eje o flecha, el rotor con la jaula de ardilla, el estator con los devanados, la carcasa con el sistema de refrigeración, la caja de conexiones, la placa de características, la base de fijación, el ventilador, la cubierta trasera o tapa posterior y las arandelas.

Del mismo modo la figura 7 (a) muestra el estator y los correspondientes devanados y en (b) el rotor, la jaula de ardilla, el eje, los rodamientos, la placa de características.

En este caso es una máquina del Laboratorio de la E.P. de Ingeniería Eléctrica de la UNSAAC.

Figura 6

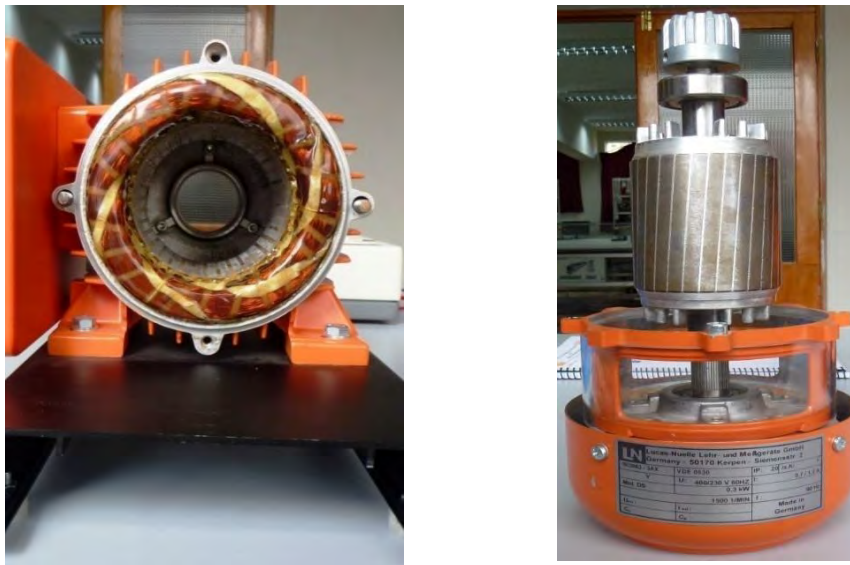
Componentes estructurales del motor trifásico de inducción



Nota: Gráfica capturada de Plaza, D. (2023), se muestra las componentes básicas como el estator, rotor, tapas, ventilador, rodamientos, eje, carcasa, borneras y otros

Figura 7

Componentes estructurales del motor trifásico de inducción: Estator y rotor



Nota: Fotografías del laboratorio de Máquinas eléctricas de la E.P. de Ingeniería Eléctrica – UNSAAC (2024)

B. Principio de funcionamiento

Según George J. Thaler en su texto Máquinas Eléctricas, respecto a los motores de inducción considera:

Que la corriente trifásica que se inyecta en cada una de las bobinas del estator produce una distribución prácticamente sinusoidal de la fuerza magnetomotriz en el entrehierro. En el entrehierro de las máquinas reales existen varias armónicas espaciales de la fuerza magnetomotriz, pero la distribución de los conductores en las ranuras reduce considerablemente sus magnitudes. En cualquier caso, es posible incluir este efecto en los análisis de la máquina aplicando la descomposición de la distribución periódica de la fuerza magnetomotriz en series de Fourier y el principio de superposición, siempre y cuando el comportamiento del circuito magnético de la máquina sea aproximadamente lineal.

Algunos modelos permiten modelar la saturación del material magnético. Hasta ciertas intensidades de campo magnético, la permeabilidad relativa es prácticamente infinita, y el potencial magnético se consume casi totalmente en el entrehierro de la máquina. A medida que aumenta la intensidad de campo, el material reduce su permeabilidad relativa.

Los modelos clásicos de régimen permanente, equilibrado o desequilibrado, y los modelos transitorios o dinámicos de la máquina de inducción necesitan utilizar un conjunto mínimo de hipótesis que simplifican razonablemente el problema, manteniendo siempre un compromiso entre la exactitud y la simplicidad. Las principales hipótesis que se utilizan para este fin son:

- La máquina de inducción se compone de dos piezas cilíndricas, una fija denominada estator y otra centrada en su interior, con un diámetro ligeramente inferior, denominada rotor.
- Se desprecian los efectos de las ranuras del estator y del rotor, con lo cual el entrehierro de la máquina es prácticamente constante.
- Las bobinas del estator son simétricas, y están repartidas uniformemente en la periferia o manto del cilindro. Normalmente la máquina posee tres fases en el estator, pero también es posible que en algunas ocasiones disponga de tan solo una o dos fases.
- La distribución espacial de la fuerza magnetomotriz producida por las corrientes inyectadas en cada una de las fases es prácticamente sinusoidal.
- Cuando esta hipótesis no es válida para una máquina en cuestión, se puede utilizar el principio de superposición para modelar la máquina en armónicos espaciales, considerando que el material ferromagnético no se satura en el rango de operación.
- La saturación puede ser considerada en los diferentes modelos, pero siempre se desprecia la no linealidad introducida por la histéresis. Las pérdidas ocasionadas en el núcleo magnético por el efecto Joule y por los ciclos de histéresis pueden ser consideradas, incluyendo resistencias adicionales en los circuitos equivalentes.
- El rotor de la máquina puede ser bobinado o de jaula de ardilla, en algunos casos el número de fases y el número de pares de polos del rotor coinciden con los del estator. La coincidencia entre el número de fases del estator y rotor no es necesaria, pero simplifica los modelos. Los rotores de jaula de ardilla tienen siempre cortocircuitadas sus barras (Thaler, 1974) [22]

C. Circuito equivalente del motor

La teoría descrita por Julio Álvarez (2013) de la Universidad Técnica Nacional, indica que:

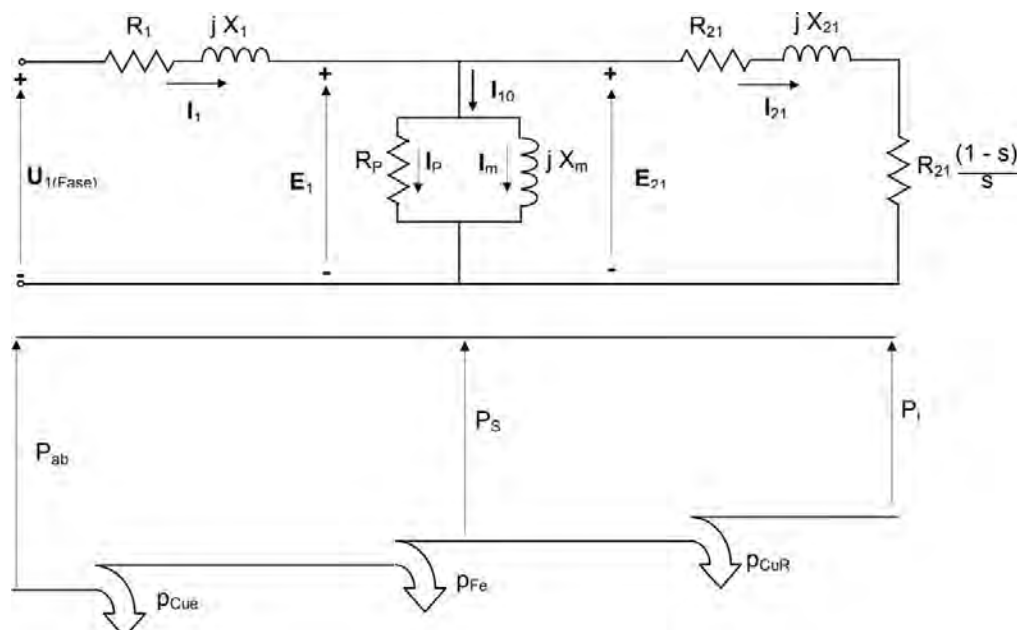
El circuito equivalente del motor trifásico de inducción o asincrónico, puede asimilarse al de un transformador. En el estator, tenemos tres bobinas que originan un campo magnético rotante. Las mismas presentan una resistencia óhmica distribuida a lo largo de los conductores que las conforman. Además parte de las líneas de campo magnético se cierran a través del aire, conformando lo que llamamos flujo disperso. Al igual que en el transformador estos efectos los representamos por una resistencia concentrada y una reactancia de dispersión. El núcleo magnético está dividido en dos partes, una fija que es el estator y otra móvil que es el rotor, lo cual implica una separación de aire entre ambas (entrehierro). Por lo tanto, se va a necesitar una corriente magnetizante (bastante mayor que en el caso de un transformador debido al entrehierro mencionado), y además tenemos las pérdidas en el hierro. Ambos efectos los representaremos en forma análoga, mediante una resistencia y una reactancia en paralelo (Álvarez, 1974)

Las pérdidas en el hierro del rotor son muy pequeñas, cuando gira a la velocidad de régimen, ya que las frecuencias de las corrientes son pequeñas.

En el caso del rotor la fem inducida depende de la velocidad del eje y del número de espiras, también los conductores presentan resistencia óhmica y hay flujo disperso, el mismo que se representa mediante una reactancia de dispersión. En consecuencia el circuito equivalente del motor de inducción y las pérdidas será como lo muestra la figura 8.

Figura 8

Circuito equivalente por fase del motor de inducción y las pérdidas.



Nota: Gráfica capturada de Álvarez (2013), donde la representación del circuito equivalente es:

R_1 : La resistencia óhmica de la bobina estatórica de una fase [Ω]

X_1 : Reactancia de dispersión de la bobina estatórica de una fase [Ω]

R_p : Resistencia que representa las pérdidas en el hierro por fase [Ω]

X_m : Reactancia de magnetización por fase [Ω]

U_1 : Tensión de fase de alimentación al motor [V]

E_1 : Fuerza electromotriz inducida de fase en la bobina estatórica [V]

I_1 : Corriente estatórica con carga [A]

I_{10} : Corriente estatórica del motor en vacío [A]

I_{21} : Corriente del rotor referido al estator [A]

R_{21} : Resistencia del rotor referido al estator [Ω]

X_{21} : Reactancia de dispersión del rotor referido al estator [Ω]

S : Deslizamiento

P_{Cue} : Pérdidas en el cobre del estator [W]

P_{FE} : Pérdidas en el núcleo [W]

P_{CuR} : Pérdidas en el rotor [W]

D. Las ecuaciones de potencia y par (torque)

En el circuito equivalente, la potencia está representada por la resistencia de carga, cuyo valor es:

$$R_{21} \frac{(1-s)}{s}$$

Luego la potencia será:

$$P_i = 3 \cdot I_{21}^2 \cdot R_{21} \frac{(1-s)}{s}$$

Como la corriente del rotor referido al estator es:

$$I_{21} = \frac{E_{TH\text{Fase}}}{\sqrt{\left(\frac{R_{21}}{s} + R_{TH}\right)^2 + (X_{21} + X_{TH})^2}}$$

Reemplazando tenemos:

$$P_i = 3 \frac{E_{TH\text{Fase}}^2 \cdot R_{21} \left(\frac{1-s}{s}\right)}{\left(\frac{R_{21}}{s} + R_{TH}\right)^2 + (X_{21} + X_{TH})^2}$$

Por otra parte el Par o torque (T_i) esta expresado en función de la potencia [w] y la velocidad W [rad/s].

Por consiguiente:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = \omega_s (1-s) = \frac{60 \cdot f}{p} (1-s)$$

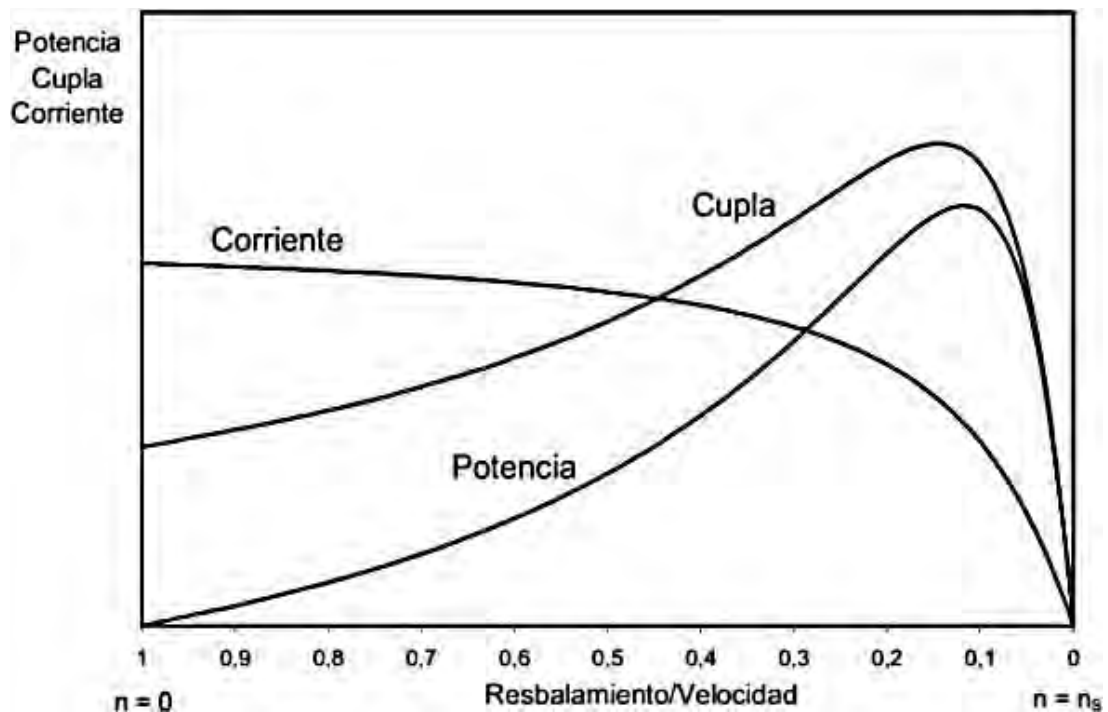
$$T_i = 3 \frac{E_{THFase}^2 \cdot R_{21} \left(\frac{1-s}{s} \right)}{\left[\left(\frac{R_{21}}{s} + R_{TH} \right)^2 + (X_{21} + X_{TH})^2 \right] \omega_s (1-s)}$$

$$T_i = 3 \frac{E_{THFase}^2 \frac{R_{21}}{s}}{\left[\left(\frac{R_{21}}{s} + R_{TH} \right)^2 + (X_{21} + X_{TH})^2 \right] \omega_s}$$

La relación gráfica entre las variables corriente del estator, el par (cupla – torque) en el eje y la potencia del motor de inducción referenciado con el deslizamiento se muestra en la Figura 9.

Figura 9

Curvas de corriente, par y potencia con relación al deslizamiento o resbalamiento



Nota. Gráfica capturada de Álvarez (2013), relación de potencia, el par y la corriente en función del deslizamiento.

2.3 Marco conceptual

2.3.1 Planificación

Según Guillermo Westreicher expresado en Economipedia, La Planificación está definida como:

La estructuración de una serie de acciones que se llevan a cabo para cumplir determinados objetivos. La planificación es entonces, en términos generales, la definición de los procedimientos y estrategias a seguir para alcanzar ciertas metas.

Dentro de la planificación podemos identificar tres etapas:

- Identificación del problema a resolver y/o de los objetivos que se desean cumplir.
- Proponer soluciones y estrategias que se deban seguir para resolver el problema identificado o para cumplir con las metas planteadas.
- Después de analizar todas las opciones, determinar cuáles son las acciones más eficientes para cumplir con los objetivos propuestos, estructurando un plan.

Tomando en cuenta lo anterior, podemos concluir que para llevar cabo una adecuada planificación es importante contar con la mayor y mejor información posible, así como con la colaboración y convicción del equipo que ejecutará el plan a definir (si nos referimos a un grupo o empresa). De otro modo, no se conseguirán los resultados esperados.

La planificación puede clasificarse de distinta forma, por ejemplo, de acuerdo con el horizonte de aplicación puede ser de corto, mediano o largo plazo.

Asimismo, puede ser planificación reactiva cuando plantea acciones a seguir ante eventos que exijan una respuesta inmediata, o puede ser una planificación proactiva, cuando la firma busca anticiparse a las contingencias, previniendo dichos inconvenientes en lugar de esperar a que pasen para responder a ellos.

Una mención aparte merece la planificación estratégica que es formular, implantar y evaluar un conjunto de decisiones, que se deben desarrollar de una forma interfuncional dentro de la empresa, para que los objetivos propuestos sean alcanzados. Esto, a partir del diagnóstico de la situación presente de la compañía (Westreicher, 2021).

Respecto a la Planificación, María Bernal (2012) sostiene lo siguiente:

La planificación es la primera función administrativa porque sirve de base para las demás funciones. Esta función determina por anticipado cuáles son los objetivos que deben cumplirse y que debe hacerse para alcanzarlos; por tanto, es un modelo teórico

para actuar en el futuro. La planificación comienza por establecer los objetivos y detallar los planes necesarios para alcanzarlos de la mejor manera posible.

La planificación determina donde se pretende llegar, que debe hacerse, como, cuando y en qué orden debe hacerse.

La planificación desde el punto de vista de diferentes pioneros de la administración se puede conceptualizar de las siguientes maneras:

- La planificación es seleccionar información y hacer suposiciones respecto al futuro para formular las actividades necesarias para realizar los objetivos organizacionales.
- La planificación es una técnica para minimizar la incertidumbre y dar más consistencia al desempeño de la empresa.
- La planificación es en gran medida la tarea de hacer que sucedan cosas que de otro modo no sucederían.

2.3.2 Mantenimiento de la máquina eléctrica

La importancia de la máquina eléctrica en la industria es analizada por Daniel Mata y sostiene que:

En una empresa siderúrgica, las máquinas eléctricas juegan un papel crítico en el proceso de producción. Los equipos encargados de mantener las máquinas en operación dependen especialmente del deterioro de los motores eléctricos de corriente continua, responsables de los procesos de producción. Estos equipos son sometidos a frecuentes inspecciones en los que se puede observar desgastes acelerados de las escobillas y temperaturas superiores a las nominales en el área del colector que afectan la conmutación de la corriente. Estos problemas reducen la disponibilidad de la cadena de producción debido a la ocurrencia de fallas en estas máquinas” (Mata, 2008).

2.3.3 Matriz de fallas

De acuerdo con Santiago A. Dorrbercker, la Matriz de falla:

Es una novedosa herramienta creada que constituye el único modo para la aplicación del diagnóstico integral y tomar las decisiones adecuadas en las instalaciones industriales y su equipamiento. En el presente trabajo se muestra el camino seguido para la obtención de la matriz de fallas correspondiente a los motores de inducción de gran potencia (MIGP). Los resultados obtenidos están soportados en un diagrama de Ishikawa caracterizado por 11 causas principales, 31 subcausas y 36 motivos de falla. Los resultados del presente trabajo constituyen el punto a partir del cual se obtiene la matriz de ensayos de diagnóstico para los MIGP” (Dorrbercker, 2007).

2.3.4 Riesgo y causas de fallas en motores de inducción

Respecto a los riesgos Gustavo Peralta, indica la siguiente conclusión:

En la mayoría de los casos la causa de una falla mecánica es un desperfecto a nivel eléctrico, es decir, aún si lo que se percibe como un problema sea una alteración en las características mecánicas del motor, la causa principal fue una falla eléctrica dentro del motor.

La mayoría de las fallas eléctricas aumentan la temperatura interna del motor, lo que conlleva a un aumento tanto de las pérdidas por calentamiento como de las pérdidas mecánicas afectando su rendimiento.

Es importante realizar un control periódico preventivo que permita garantizar el funcionamiento óptimo del motor.

Una prueba de diagnóstico de motores no proporciona un conocimiento total del estado real del motor, es la combinación de diversas pruebas en línea y fuera de línea del motor, lo que permite determinar el estado real del mismo.

El mantenimiento empieza en la selección del motor. Frecuentemente se hace la selección sin considerar las implicaciones en el servicio y mantenimiento del motor, de lo que resultan consecuencias económicas desfavorables.

El mantenimiento preventivo bien aplicado disminuye los costos de producción, aumenta la productividad, así como la vida útil de la maquinaria y equipo, obteniendo como resultado la disminución de paro de máquinas.

El mantenimiento preventivo es importante en cualquier instalación y no debe interferir con la función de línea de producción. La interferencia con la producción debe ser mínima. Con una planeación cuidadosa, gran parte del trabajo se puede hacer mientras las máquinas están en plena producción, pues es cuando mejor se puede observar la conmutación, vibraciones, calentamiento y temperaturas (Peralta, 2009) [19]

2.3.5 Marco Normativo

En general la manufactura de los motores de inducción cumple con las normas, las prescripciones y recomendaciones de la VDE, ICONTEC, DIN, NEMA e IEC, entre otros se puede mencionar: VDE 0530 prescripción de máquinas eléctricas; IEC 34-1 recomendaciones para máquinas eléctricas rotativas; IEC 144 recomendaciones para motores normalizados; DIN 42673 medidas y potencia de motores, del mismo modo DIN 42677 que señala características constructivas, fichas de homologación de equipos energéticos para motores eléctricos RM N° 223-2017- MEM/DM

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE CRITICIDAD DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

3.1 Generalidades

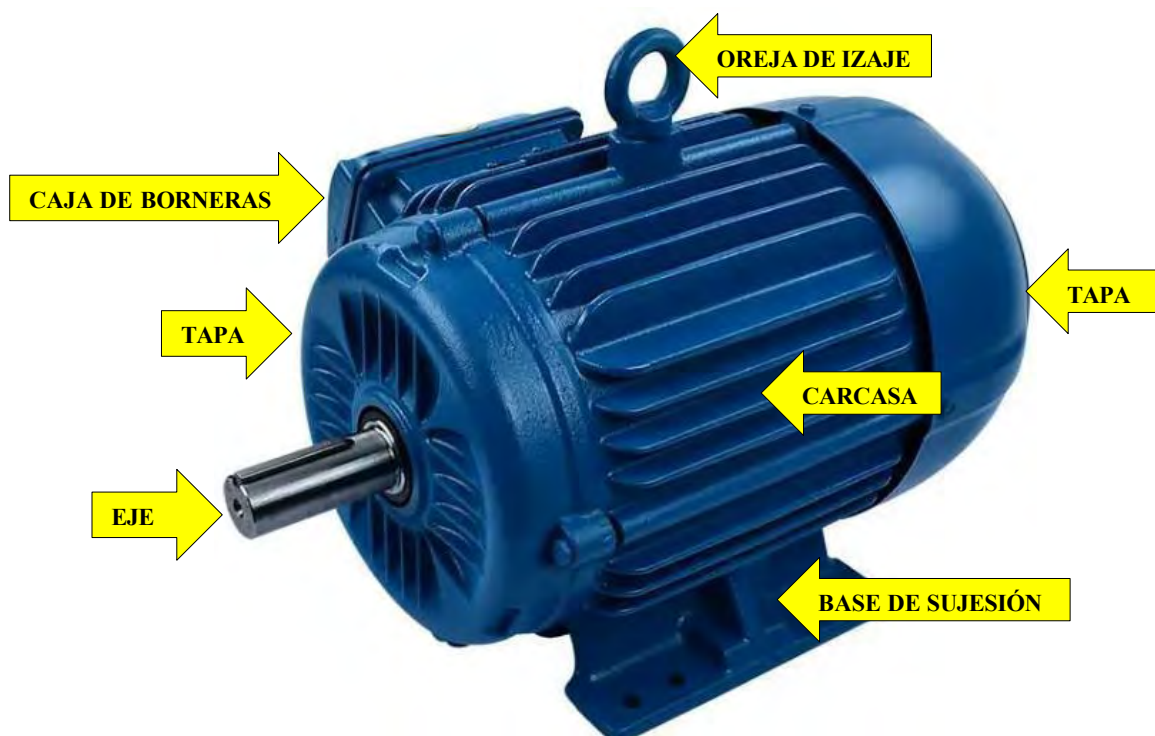
El análisis de la criticidad es un instrumento que permite en primer lugar identificar, luego jerarquizar por el nivel de importancia los componentes de la infraestructura, maquinaria, equipamiento o instalaciones, en el caso del presente trabajo se analizará la criticidad de las componentes principales del motor de inducción trifásico.

La aplicación del concepto de criticidad ayuda a reconocer eventos potencialmente indeseados en el contexto de la confiabilidad operacional. Es pertinente conocer la capacidad de las componentes del motor de acuerdo con los diseños y tiempo de vida útil, para conocer su jerarquía donde se pueda subdividir los elementos en secciones que puedan ser controladas y funcionalmente verificadas.

La Figura 10 muestra el motor en la que se analizara la criticidad de cada una de sus componentes, tanto externas como internas del mismo.

Figura 10

El motor de inducción trifásico



Nota: Componentes externas del motor de inducción.

Las componentes básicas del motor de inducción trifásicas fundamentalmente son: El estator, el rotor, rodamientos, la tapa o cubierta frontal, el eje o flecha, la carcasa, la placa

de características, la base mecánica o de fijación, el ventilador, la tapa o cubierta posterior, los devanados del estator, la jaula de ardilla del rotor, los empaques, las borneras y otros accesorios.

Para determinar la criticidad de cada componente básica del motor de inducción consideramos:

3.2 Determinación de frecuencia de fallas

Para el análisis de la “criticidad” se utiliza el método de los factores ponderados y basados en la teoría del “riesgo” (Woodhouse, 1994).

La frecuencia está asociada al número de eventos o fallas que se presenta en cada una de las componentes del motor de inducción, las mismas que tienen que estar registradas en la base de datos implementada para tal caso. El sistema o proceso evaluado y la consecuencia está referida con: el impacto y flexibilidad operacional, los costos de reparación y los impactos en seguridad y ambiente.

3.3 Determinación de consecuencia

La consecuencia está vinculada con el Impacto operacional, Flexibilidad operacional, Costos de mantenimiento, Impacto seguridad y Medio ambiente. En consecuencia, la fórmula de criticidad esta expresado por:

$$\text{CRITICIDAD} = \text{Frecuencia de Falla (FF)} \times \text{Consecuencia}$$

$$\text{Consecuencia} = (\text{IO} * \text{FO}) + \text{CM} + \text{ISAH}$$

Donde:

IO = Impacto de operación

FO = Flexibilidad operacional

CM = Costos de mantenimiento

ISAH = Impacto seguridad, medio ambiente e higiene

3.4 Principales criterios para el análisis de criticidad

Los principales criterios que se consideran para el análisis son las siguientes:

- (FF) Frecuencia de falla: Corresponde al número de veces que cualquier componente del motor de inducción trifásico falle.
- (IO) Impacto Operacional: Es el % de afectación en la producción
- (FO) Flexibilidad operacional: Es la disposición de los equipos alternativos o de reemplazo

- (CM) Costos operacionales de mantenimiento): Se refiere a los costos que significan las fallas y en algunos casos está muy relacionado con el lucro cesante (ingresos que se deja de percibir por parada de máquina)
- (ISAH) Impacto seguridad, ambiente e higiene: Posibilidad que ocurra o se presenten eventos no deseados con daños a la seguridad del ambiente y a las personas.

3.5 Tabla de factores ponderados de la criticidad

La tabla de factores ponderados de la criticidad es una herramienta que se utiliza comúnmente en el análisis de la criticidad, la gestión de activos o la planificación de mantenimiento. Su propósito es priorizar elementos, equipos, procesos o actividades en función de su importancia relativa o criticidad, utilizando criterios previamente definidos.

Tiene las siguientes aplicaciones:

Identificación de prioridades: Ayuda a determinar qué elementos son más críticos para el sistema o proceso, de modo que puedan recibir mayor atención en términos de mantenimiento, monitoreo o inversión.

Asignación de recursos: Permite distribuir los recursos (humanos, financieros o materiales) de manera eficiente, enfocándose en los elementos más críticos.

Gestión del riesgo: Facilita la identificación de posibles riesgos asociados con fallas o problemas en equipos o procesos críticos, lo que ayuda a mitigar impactos negativos.

Planificación estratégica: Contribuye al diseño de estrategias de mantenimiento (predictivo, preventivo o correctivo) y mejora la toma de decisiones.

Para determinar la criticidad de las componentes del motor de inducción se aplicó esta tabla de ponderación, en función a la información obtenida en los centros de reparación y mantenimiento de motores eléctricos.

Se toma en cuenta:

La frecuencia de fallas

Impacto operacional

Flexibilidad operacional

Costo de mantenimiento

Impacto de seguridad, ambiente e higiene.

La Tabla 4, nos muestra la cuantificación de cada uno de los factores ponderados de la criticidad, los mismos que fueron elaborados en función a la recomendación de Wooddhouse (1994).

Tabla 4*Factores ponderados de criticidad*

TABLA DE FACTORES PONDERADOS DE LA CRITICIDAD	
FRECUENCIA DE FALLAS (FF)	PONDERACIÓN
Mayor o igual a 8 fallas/año	4
De 5 a 7 fallas/año	3
De 2 a 4 fallas/año	2
Menor o igual a 1 falla/año	1
IMPACTO OPERACIONAL (IO)	PONDERACIÓN
Parada inmediata de toda la producción	10
Afecta mas del 50% a la producción	7
Afecta menos del 50% a la producción	4
No afecta a la producción	1
FLEXIBILIDAD OPERACIONAL (FO)	PONDERACIÓN
No se dispone de otro equipo igual o similar	4
El sistema puede seguir funcionando	2
Se dispone de otro equipo igual o similar	1
COSTO DE MANTENIMIENTO (CM)	PONDERACIÓN
Mas de US\$ 10,000	3
Entre US\$ 5,000 y menos de US\$ 10,000	2
Menos de US\$ 5,000	1
IMPACTO EN SEGURIDAD AMBIENTE E HIGIENE (ISAH)	PONDERACIÓN
Afecta a la seguridad humana	8
Afecta al medio ambiente produciendo daños reversibles	6
Afecta las instalaciones causando daños severos	4
Provoca daños menores – accidentes o incidentes	2
Provoca impacto ambiental cuyo efecto no viola las normas ambientales	1
No provoca ningún tipo de daño a personas, instalaciones o al ambiente	0

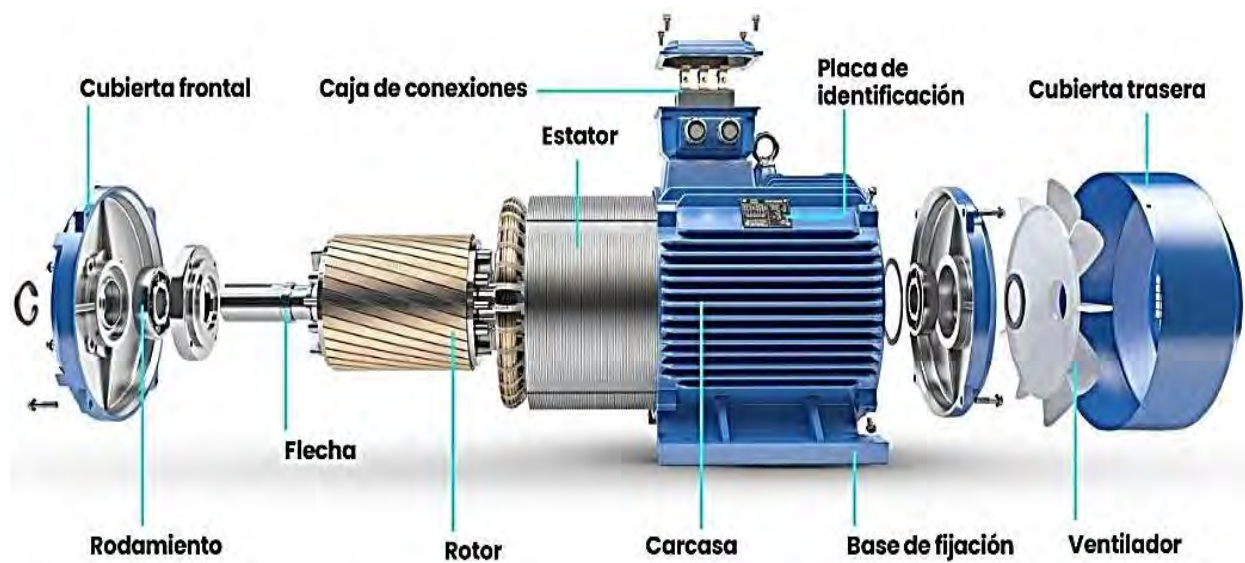
Nota: Tabla capturada de Wooddhouse. 1994. The Woodhouse Paetnership Limited. Que cuantifica y pondera los factores que intervienen en el análisis de la criticidad.

3.6 Matriz de criticidad

Con la finalidad de conocer la matriz de criticidad del motor de inducción trifásico se aplica los factores de criticidad para cada componente del motor de inducción trifásico, Figura 11.

Figura 11

Componentes principales del motor de inducción trifásico



Nota: Gráfica extraída de Traction (2020), Mantenimiento de equipos industriales.

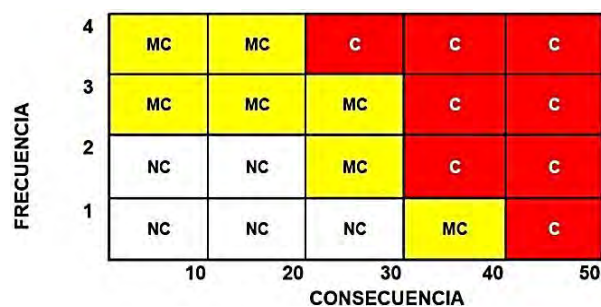
Tomando en cuenta la tabla 4 “Factores ponderados de la criticidad” se elabora la Matriz de criticidad mostrado en la tabla 5 “Matriz de criticidad de las componentes principales del motor”, donde se asignan los valores ponderados de criticidad en función a los datos de las empresas de mantenimiento y entrevistas desarrolladas a los especialistas en mantenimiento de máquinas eléctricas (Anexo I).

Esta matriz de criticidad determina el nivel de importancia relativa de cada componente del motor de inducción y priorizar acciones de mantenimiento preventivo cuando la cuantificación logra niveles elevados de acuerdo con la gráfica de criticidad, figura 12 en los que se considera:

NC = Componente NO CRÍTICA

MC = Componente de MEDIA CRITICA (SEMI CRÍTICO)

C = Componente CRÍTICA

Figura 12*Cualificación de criticidad*

Fuente: Gráfica capturada de Gestión del mantenimiento. Ángel Mendizábal (2020)

Tabla 5*Matriz de criticidad de las componentes principales del motor de inducción trifásico*

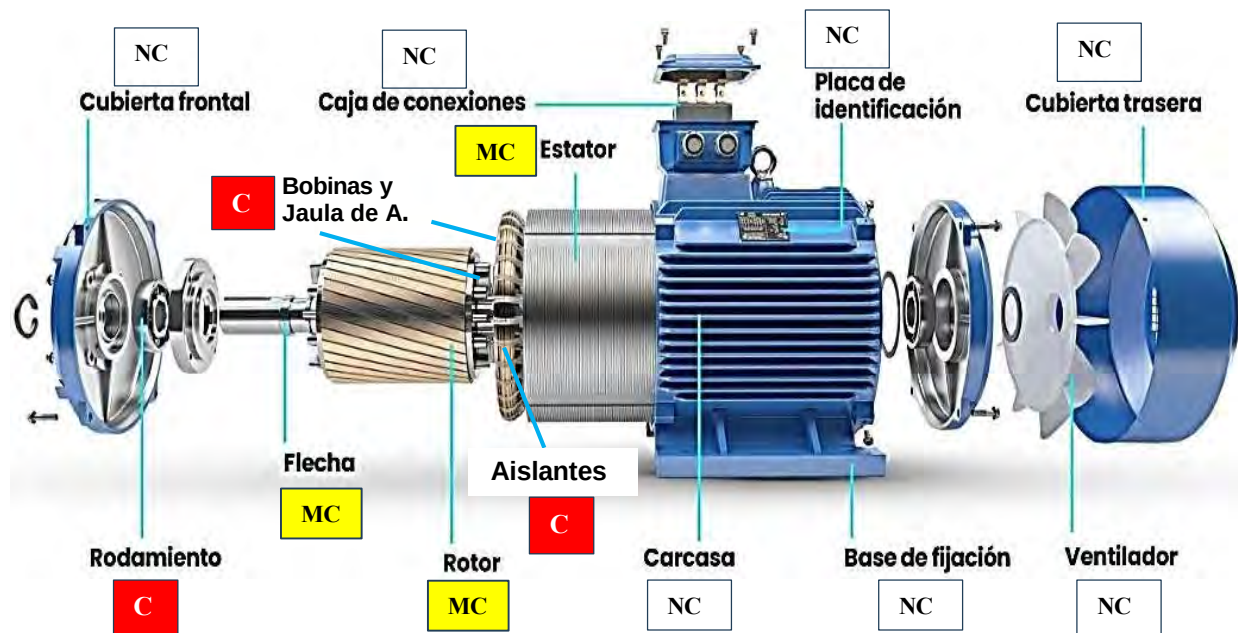
CÓDIGO EQUIPO	PARTES DEL MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO	FRECUENCIA DE FALLAS (FF)	IMPACTO OPERACIONAL (IO)	FLEXIBILIDAD OPERACIONAL (FO)	COSTO DE MANTENIMIENTO (CM)	IMPACTO EN SEGURIDAD AMBIENTE E HIGIENE (ISAH)	NIVEL DE CRITICIDAD FF X C
CF	CUBIERTA FRONTAL	1	7	2	1	2	NC
FL	FLECHA O EJE	1	7	4	1	4	MC
ROT	ROTOR	1	7	4	1	4	MC
JA	JAULA DE ARDILLA	1	10	4	1	4	C
ES	ESTATOR	1	7	4	1	4	MC
BO	BOBINAS	2	10	4	1	4	C
AI	AISLANTES	2	10	4	1	4	C
CA	CARCASA	1	4	2	1	2	NC
CC	CAJA DE CONEXIONES	1	4	2	1	2	NC
ROD	RODAMIENTOS	2	10	4	1	4	C
VE	VENTILADOR	1	4	1	1	1	NC
CP	CUBIERTA POSTERIOR	1	7	2	1	2	NC

Nota: Análisis de la criticidad del motor de inducción.

Luego identificamos en la figura 13 de componentes del motor de inducción trifásica con los niveles de criticidad determinados en la tabla 5.

Figura 13

Niveles de criticidad en las componentes principales del motor de inducción trifásico



Fuente: propia

Componente NO CRÍTICA

NC

Componente MEDIA CRÍTICA

MC

Componente CRÍTICA

C

En la Figura 13, se puede apreciar los niveles de criticidad de las componentes del motor de inducción trifásico en la que se asigna la condición de “no crítica” (NC) a las siguientes partes: cubierta frontal o tapa, la caja de conexiones, la carcasa, la base de fijación, la tapa posterior y la placa de características, significa que la posibilidad de falla en estas partes es mínima o en caso de falla estas no son determinantes en la producción y pueden ser reparadas en forma inmediata.

Por otra parte, la flecha o eje, el núcleo del estator y del rotor, tienen una “criticidad media” (MC), luego la posibilidad de falla es relativa y la incidencia en la producción afecta con cierta severidad y en caso de falla de estas componentes se requiere un trabajo inmediato especialmente en el eje porque soportan las fuerzas del torque del motor que están conectadas a la carga y además son causa para otras fallas como la excentricidad de los rodamientos y también la distancia del entrehierro.

De otro lado, las componentes consideradas “críticas” (C) son los aislantes, las bobinas o conductores del estator, la jaula de ardilla de rotor y los rodamientos, la posibilidad de falla de estas componentes es alta y tiene efectos determinantes en la producción, en estos casos el mantenimiento requiere de tecnología especializada con costos mayores que en otros casos.

Esta clasificación se utiliza para priorizar el mantenimiento y las acciones preventivas, ayudando a evitar fallas y prolongar la vida útil del motor. En general, ampliando estos conceptos se considera:

1. Componentes No Críticos

Estos componentes no tienen un impacto significativo en el funcionamiento general del motor o en la seguridad de la operación. Su falla puede causar inconvenientes, pero no suele llevar a una parada inesperada ni a daños graves.

Ejemplos: Elementos como la carcasa del motor, tapas y componentes estéticos o accesorios que no afectan directamente el rendimiento operativo.

Mantenimiento: Se revisan con menor frecuencia y pueden ser reemplazados o reparados cuando sea conveniente.

2. Componente de Media Crítica

Definición: Estos componentes son importantes para el rendimiento y la eficiencia del motor, pero su falla no necesariamente resulta en una parada inmediata o en un daño severo. Su mal funcionamiento puede afectar la operación, pero hay un margen de tolerancia antes de que se convierta en un problema grave.

Ejemplos: Elementos como el eje, el núcleo del estator, el núcleo del rotor entre otros.

Mantenimiento: Se debe llevar a cabo un monitoreo y mantenimiento periódico para evitar fallas que puedan convertirse en problemas críticos. La atención a estos componentes es importante para evitar un deterioro progresivo.

3. Componente Crítico

Definición: Estos componentes son esenciales para el funcionamiento del motor y su falla puede provocar paradas inesperadas, daños severos o un riesgo significativo para la seguridad de la operación. La integridad de estos elementos es vital para mantener el motor en funcionamiento.

Ejemplos: Devanado del estator, jaula de ardilla, sistema de enfriamiento, el sistema de aislamiento de los devanados y el rodamiento.

Mantenimiento: Requieren un monitoreo constante y un mantenimiento preventivo riguroso. Cualquier signo de desgaste o mal funcionamiento debe ser abordado de inmediato para evitar fallas catastróficas.

Se consideran también críticos los sistemas de control de los motores o tableros de alimentación, los sistemas de control de carga y aspectos indirectos de falla: tensión, frecuencia y maniobra.

Conclusión

El análisis de criticidad de un motor de inducción permite priorizar las acciones de mantenimiento, optimizar recursos y minimizar el riesgo de fallas costosas o peligrosas. Los componentes críticos son los más importantes y deben recibir atención prioritaria, mientras que los no críticos pueden ser revisados con menos frecuencia.

CAPÍTULO IV

LA MATRIZ DE FALLAS DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

4.1 GENERALIDADES.

Luego de conocer los niveles de criticidad de las componentes del motor de inducción se tiene que elaborar la matriz de fallas, mediante el método de evaluación específica para identificar, analizar y gestionar las posibles fallas que pueden presentarse en estos motores eléctricos. Este tipo de matriz permite a los técnicos e ingenieros comprender mejor los riesgos asociados con el funcionamiento de los motores de inducción, evaluar las causas y consecuencias de cada tipo de falla, y tomar medidas preventivas para garantizar su buen funcionamiento y prolongar su vida útil.

La matriz de fallas para un motor de inducción se elaboró mediante la recopilación de información (Anexo II) sobre los componentes del motor (criticidad), los modos de fallo (posibles fallos), las causas de estos fallos, los efectos o las consecuencias que pueden tener en el rendimiento y la seguridad, y las acciones de control o mantenimiento recomendadas. Se estructuró una tabla que contiene los siguientes elementos:

1. **Componente:** Parte específica del motor de inducción cuyo nivel de criticidad se determinó en el capítulo precedente (ej. rotor, estator, bobinas, sistema de enfriamiento, rodamientos, eje, etc.).
2. **Modo de fallo o posible falla:** Descripción de la falla que podría ocurrir en el componente (ej. cortocircuito, desbalance de voltaje, desgaste de rodamientos, degradación del aislamiento etc.).
3. **Efecto o consecuencia de la falla:** Efectos de la falla sobre el motor y su operación (ej. Parada del motor, pérdida de eficiencia, daño a otros componentes, etc.).
4. **Causa de la falla:** Factores o condiciones que pueden provocar la falla (ej. sobrecarga, problemas de suministro, falta de mantenimiento, tiempo de vida útil, daño por partículas externas, etc.).
5. **Probabilidad de ocurrencia:** Estimación de la frecuencia con la que podría ocurrir la falla (alta, media, baja). Expresada por el análisis de criticidad.
6. **Gravedad del impacto:** Nivel de daño que la falla podría causar (alto, medio, bajo).
7. **Controles o medidas preventivas/correctivas:** Acciones que deben tomarse para evitar o mitigar la falla (ej. mantenimiento regular, monitoreo de temperatura, revisión de conexiones eléctricas, etc.).

4.2 MATRIZ DE FALLA DEL ESTATOR DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

4.2.1 Modo de fallo: el motor no arranca.

La matriz de fallo se muestra en el Tabla 6

Tabla 6

Matriz de falla: El motor no arranca

COMPONENTE	PROCESO	MODOS DE FALLO	EFEECTO	CAUSA	CONTROLES
ESTATOR	MANTTO DEL ESTATOR	MOTOR NO ARRANCA - I	MOTOR INOPERATIVO	PROBLEMAS EN EL SUMINISTRO DE ENERGIA	REVISIÓN DEL TABLERO DE CONTROL Y MANDO
ESTATOR	MANTTO DEL ESTATOR	MOTOR NO ARRANCA - II	MOTOR INOPERATIVO	PROBLEMAS EN SISTEMA DE CONTROL Y MANDO	REVISIÓN DEL TABLERO DE CONTROL Y MANDO
ESTATOR	MANTTO DEL ESTATOR	MOTOR NO ARRANCA -III	MOTOR INOPERATIVO	CIRCUITOS ABIERTOS O DESCONECTADOS DEL ESTATOR	REVISIÓN DEL TABLERO DE CONTROL Y MANDO
ESTATOR	MANTTO DEL ESTATOR	MOTOR NO ARRANCA - IV	MOTOR INOPERATIVO	DISPAROS DE SOBRECARGA	REVISIÓN DEL TABLERO DE CONTROL Y MANDO

Nota. Desarrollado mediante revisión bibliográfica y entrevista, la pregunta a la que responde el cuadro es ¿Por qué el motor no arranca? y se formulan las causas, efectos y controles.

Cuando un motor de inducción **no arranca**, pueden existir múltiples causas que van desde problemas en el circuito eléctrico, en el circuito mecánico y problemas en el sistema de accionamiento y control. Identificar la causa específica es esencial para tomar las medidas correctivas adecuadas. A continuación, se detallan las causas más comunes por las que un motor de inducción puede no arrancar:

1. Problemas en la alimentación de energía eléctrica

- *Falta de suministro eléctrico:* Si no hay energía en el sistema de alimentación del motor, el motor no podrá arrancar.
- *Desbalance de tensión:* Un desbalance de tensión en la red de suministro puede causar que el motor no arranque correctamente o que funcione de manera anormal.
- *Baja tensión de línea:* Si la tensión de alimentación es demasiado baja, el motor no tendrá suficiente potencia para arrancar.
- *Fusibles quemados o interruptores disparados:* Los fusibles o interruptores de protección pueden haber fallado y desconectado el suministro eléctrico.

2. Problemas en el arranque del motor

- *Fallas en el sistema de arranque:* Un sistema de arranque defectuoso, como un arrancador estrella-triángulo o un arrancador de resistencia, puede impedir que el motor inicie.

- *Interruptor de arranque dañado*: Si el interruptor de arranque está roto o tiene conexiones defectuosas, el motor no recibirá la señal eléctrica, es decir no circulará ninguna corriente para arrancar.

3. Problemas en el motor

- *Conexiones eléctricas sueltas o dañadas*: Las conexiones en el estator o en el rotor pueden estar sueltas, corroídas o dañadas, lo que interfiere con el flujo de corriente necesario para el arranque.
- *Cortocircuito o fallo de aislamiento*: Un cortocircuito entre las espiras del devanado o un fallo en el aislamiento del motor puede impedir que el motor arranque.
- *Bobinados quemados o dañados*: Los bobinados del motor pueden haberse quemado o deteriorado debido a un sobrecalentamiento o una sobretensión, lo que impide el arranque.
- *Problemas en el rotor*: En motores de inducción de jaula de ardilla, un rotor dañado o un cortocircuito en las barras del rotor puede causar fallos en el arranque.

4. Problemas mecánicos

- *Atascos físicos*: Si el eje del motor está bloqueado por un objeto o hay fricción excesiva en los rodamientos, el motor no podrá arrancar.
- *Rodamientos dañados o desgastados*: Rodamientos defectuosos pueden causar un bloqueo en el motor, impidiendo que el eje gire libremente.
- *Sobrecarga en el sistema mecánico*: Si hay una carga conectada al motor que es demasiado pesada o si hay un atasco en el sistema de transmisión, esto puede hacer que el motor no pueda arrancar.

5. Problemas con el sistema de control

- *Fallas en el control de arranque*: Problemas en los sistemas de control automático, como los relés, temporizadores o PLCs que gestionan el arranque, pueden causar que el motor no reciba la señal para comenzar a girar.
- *Problemas en los sensores y dispositivos de protección*: Sensores de temperatura, presión o protección de sobrecarga pueden estar activados, bloqueando el arranque del motor por motivos de seguridad.

6. Problemas con el sistema de protección

- *Protección de sobrecarga activada*: Si la protección de sobrecarga está activada, el motor no recibirá energía hasta que se restablezca la condición de arranque, en consecuencia el motor está en modo seguridad.

- *Protección contra cortocircuitos*: Un dispositivo de protección contra cortocircuitos puede estar activado debido a un cortocircuito en el sistema.

7. Problemas de temperatura

- *Motor sobrecalentado*: Si el motor ha alcanzado una temperatura de operación demasiado alta, los dispositivos de protección térmica pueden impedir el arranque para evitar daños.
- *Falta de refrigeración*: Un sistema de ventilación obstruido o mal funcionamiento en el ventilador de refrigeración puede hacer que el motor se sobrecaliente y no arranque.

8. Problemas de carga

- *Sobrecarga de la carga*: Si la carga conectada al motor es mayor de la que puede soportar, el motor puede no arrancar correctamente.
- *Bloqueo de carga*: Un atasco en la carga que el motor debe mover, como una bomba o una cinta transportadora, puede impedir el arranque.

9. Problemas de calidad de la energía

- *Interrupciones en el suministro eléctrico*: Cortes o fluctuaciones en el suministro eléctrico pueden hacer que el motor no arranque correctamente.
- *Ruido eléctrico o interferencias*: Las perturbaciones en el suministro de energía pueden afectar el funcionamiento del motor.

• Conclusión y medidas de solución:

Para diagnosticar correctamente la causa de que un motor de inducción **no arranque**, es fundamental realizar una revisión detallada de todos los componentes eléctricos, mecánicos y de control del motor. Algunas medidas de solución incluyen:

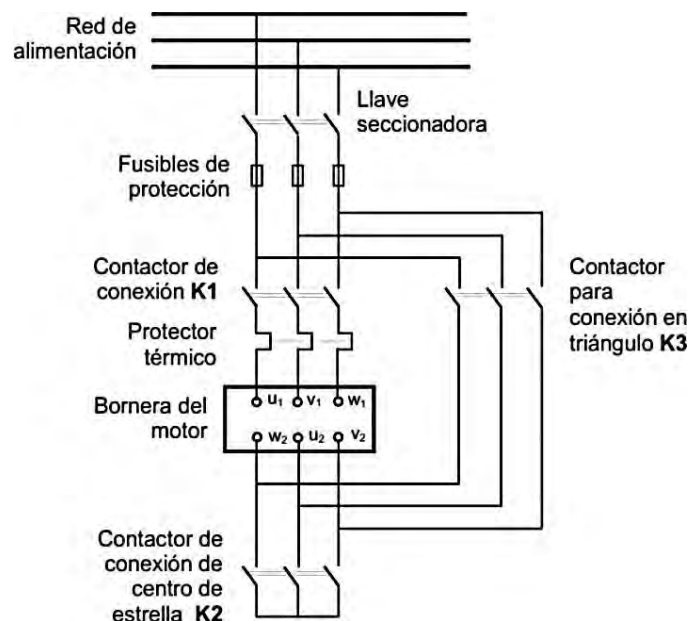
- Verificar el suministro eléctrico y la calidad de la energía.
- Comprobar las conexiones y el estado de los devanados.
- Inspeccionar el sistema de arranque y los dispositivos de control.
- Realizar pruebas de resistencia y aislamiento.
- Revisar y limpiar el sistema de ventilación y los rodamientos.

La aplicación del mantenimiento preventivo puede neutralizar las causas y prevenir daños mayores con la finalidad de asegurar un funcionamiento confiable del motor.

La figura 14 muestra las componentes de un sistema de arranque Estrella-Triángulo, cuyo objetivo es atenuar la corriente en el proceso de arranque, para luego normalizar la misma ya en operación permanente o estacionaria.

Figura 14

Componentes que podrían fallar en una conexión estrella-triángulo



Nota. Gráfica capturada de Alvares, J. (2020)

La conexión estrella-delta, consiste en arrancar el motor con sus bobinados conectados en estrella y luego que alcanza una cierta velocidad se cambia la conexión a triángulo, recibiendo plena tensión.

Con este proceso se logra reducir la corriente de la línea a la tercera parte, pero también la cupla o el par se reduce a la tercera parte. El procedimiento consiste en:

- a) Se cierra la llave seccionadora para habilitar con tensión al sistema
- b) Se cierra el contactor K2, con lo cual se forma el centro de estrella de las bobinas del motor.
- c) Se cierra el contactor K1 con lo cual el motor recibe tensión del sistema de alimentación y se produce el arranque.
- d) después de un cierto tiempo predeterminado de acuerdo con el tipo de motor, se abre el contactor K2 y se cierra el K3 con lo cual los bobinados se conectan en triángulo.

Este proceso se realiza en forma automática y con “enclavamientos” que no permitan efectuar maniobras erróneas que puedan perjudicar el sistema (por ejemplo los contactores K2 y K3 no pueden estar simultáneamente cerrados ya que estaríamos en presencia de un cortocircuito).

Se debe tener en cuenta que para este tipo de arranque, tanto la tensión de suministro como la tensión que soportan las bobinas del motor.

En otras palabras la tensión de “línea” del suministro debe ser igual a la tensión que soportarán las bobinas conectadas en triángulo. Por ejemplo si la tensión de alimentación es de 3 x 380 V, la bobina del motor debe ser apta para 380 V.

Si en cambio la bobina es apta para 220 V, el motor solo puede trabajar en conexión estrella y no se puede realizar este tipo de arranque.

Este procedimiento funciona siempre y cuando todas las componentes estén en buenas condiciones (llave seccionadora o interruptor, fusibles de protección, contactores de conexión, protector térmico, contactor para conexión en triángulo, contactor de conexión en estrella y bornera del motor), pero si alguna de estas componentes no está en condiciones operativas el motor tendrá problemas o simplemente no funcionara.

4.2.2 Modo de fallo: Por aislamiento eléctrico.

La matriz de fallo se muestra en el Tabla 7

Tabla 7

Matriz de fallo por aislamiento I

COMPONENTE	PROCESO	MODOS DE FALLO	EFEECTO	CAUSA	CONTROLES
ESTATOR	MANTTO DEL ESTATOR	FALLO POR AISLAMIENTO ELÉCTRICO - I	SOBRECORRIENTES EN LA BOBINA PÉRDIDAS E INCREMENTO DE θ	DETERIORO DE AISLAMIENTOS ENTRE ESPIRAS - CORTOCIRCUITOS	PRUEBAS DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO Y REPARACIÓN, TERMOGRAFÍA
ESTATOR	MANTTO DEL ESTATOR	FALLO POR AISLAMIENTO ELÉCTRICO - II	SOBRECORRIENTES EN LA BOBINA PÉRDIDAS E INCREMENTO DE θ	AFLORAMIENTO DE BOBINAS	PRUEBAS DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO Y REPARACIÓN, TERMOGRAFÍA
ESTATOR	MANTTO DEL ESTATOR	FALLO POR AISLAMIENTO ELÉCTRICO - III	PÉRDIDA DEL NIVEL DE AISLAMIENTO Y PÉRDIDAS	DELA MINACIÓN DE AISLANTES	REPARACIÓN O REEMPLAZO DEL AISLAMIENTO, MEJORA DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN, EVITAR SOBRECARGAS
ESTATOR	MANTTO DEL ESTATOR	FALLO POR AISLAMIENTO ELÉCTRICO - IV	PÉRDIDA DEL NIVEL DE AISLAMIENTO Y PÉRDIDAS	ENVEJECIMIENTO	REPARACIÓN O REEMPLAZO DEL AISLAMIENTO, MEJORA DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN, EVITAR SOBRECARGAS

Nota. Desarrollado mediante revisión bibliográfica y entrevista.

Los problemas en el aislamiento de un motor de inducción son una de las principales causas de fallas y pueden comprometer el funcionamiento del motor e incluso provocar daños irreparables si no se abordan a tiempo. A continuación, se detallan las causas más comunes de problemas en el aislamiento de un motor de inducción:

1. Envejecimiento del aislamiento

- *Descripción:* Con el tiempo, los materiales aislantes del motor, como el esmalte en los devanados, se deterioran debido a la exposición continua a altas temperaturas y al envejecimiento natural de los materiales.
- *Consecuencias:* Esto puede provocar un aumento en la conductividad y una disminución de la resistencia del aislamiento, lo que aumenta el riesgo de cortocircuitos y fallas.

- *Prevención:* Realizar mantenimientos periódicos y usar motores de alta calidad con aislamiento resistente al envejecimiento.

2. Sobrecarga y sobrecalentamiento

- *Descripción:* La operación continua a temperaturas elevadas puede causar que el aislamiento se degrade más rápido de lo esperado.
- *Consecuencias:* Un aislamiento degradado pierde su capacidad de resistir el paso de corriente eléctrica, lo que puede llevar a fallos como cortocircuitos entre espiras o entre fases.
- *Prevención:* Monitorear la carga del motor y asegurar un sistema de refrigeración efectivo para evitar el sobrecalentamiento.

3. Exposición a la humedad

- *Descripción:* La humedad es una de las principales causas de la degradación del aislamiento. Cuando los devanados están expuestos a la humedad, se reduce la resistencia del aislamiento y se incrementa el riesgo de cortocircuitos.
- *Consecuencias:* La humedad puede provocar cortocircuitos internos y daños en el sistema de aislamiento.
- *Prevención:* Usar protectores contra la humedad y mantener el motor en un entorno seco y bien ventilado. Además, realizar pruebas de resistencia a la humedad.

4. Contaminación y suciedad

- *Descripción:* La acumulación de polvo, suciedad o sustancias químicas en el motor puede afectar el aislamiento. Las partículas de polvo y las sustancias químicas pueden atraer humedad y generar corrosión, debilitando los materiales aislantes.
- *Consecuencias:* El aislamiento se vuelve más propenso a fallar y puede perder sus propiedades eléctricas.
- *Prevención:* Mantener el motor limpio y realizar mantenimientos regulares para remover cualquier tipo de contaminante.

5. Sobretensiones eléctricas

- *Descripción:* Las sobretensiones en la red eléctrica pueden causar picos de tensión que superen la capacidad de aislamiento del motor.
- *Consecuencias:* Estos picos de tensión pueden romper el aislamiento y causar cortocircuitos o fallos eléctricos.
- *Prevención:* Utilizar dispositivos de protección contra sobretensiones como supresores de picos y reguladores de voltaje.

6. Desbalance de tensión

- *Descripción:* Un desbalance en las tensiones de las fases puede causar un flujo de corriente no equilibrado que sobrecarga los devanados y deteriora el aislamiento, puede presentarse en cualquiera de las fases R, S o T.
- *Consecuencias:* Puede provocar un aumento de la temperatura y un fallo prematuro del aislamiento.
- *Prevención:* Monitorear el sistema de suministro eléctrico y utilizar equipos de protección para corregir desbalances.

7. Exposición a sustancias químicas

- *Descripción:* La exposición a productos químicos como aceites, solventes y otros compuestos corrosivos puede deteriorar el aislamiento.
- *Consecuencias:* El aislamiento pierde sus propiedades eléctricas y mecánicas, aumentando el riesgo de fallas.
- *Prevención:* Asegurar que el motor esté ubicado en un entorno libre de sustancias químicas dañinas.

8. Vibraciones y golpes mecánicos

- *Descripción:* Las vibraciones excesivas y los golpes mecánicos pueden dañar el aislamiento y provocar fisuras o daños en los devanados.
- *Consecuencias:* El daño en el aislamiento puede llevar a cortocircuitos internos y fallas en el motor.
- *Prevención:* Asegurar un montaje adecuado y balancear correctamente el motor para minimizar las vibraciones.

9. Instalación deficiente

- *Descripción:* Una instalación inapropiada o el uso de materiales de baja calidad pueden llevar a problemas de aislamiento desde el principio.
- *Consecuencias:* El motor puede mostrar fallas prematuras en el aislamiento y otros componentes.
- *Prevención:* Realizar instalaciones de calidad con materiales adecuados y conforme a las especificaciones del fabricante.

10. Factores ambientales extremos

- *Descripción:* Las condiciones ambientales como temperaturas muy altas o bajas, radiación solar intensa o exposición a agentes corrosivos pueden acelerar el desgaste del aislamiento.
- *Consecuencias:* El aislamiento se deteriora y pierde su efectividad, lo que puede llevar a fallos.

- *Prevención:* Utilizar motores con clasificación para condiciones ambientales extremas y protegerlos con cubiertas y sistemas de ventilación adecuados.
- *Conclusión*

El aislamiento de un motor de inducción es un componente crítico que protege los devanados y permite su funcionamiento seguro y eficiente. Es importante realizar mantenimientos periódicos y monitorear las condiciones de operación para identificar y mitigar los problemas antes de que causen fallas importantes.

La implementación de medidas preventivas como el uso de sistemas de protección contra sobretensiones, la revisión del estado del aislamiento y el mantenimiento de condiciones operativas óptimas es esencial para prolongar la vida útil del motor.

4.2.3 Modo de fallo: Por sobretensión y la presencia de armónicos

La matriz de fallo que se presenta por sobretensión externa cuyo efecto inicial es la parada del motor por el accionamiento del sistema de protección, donde las causas probables son las descargas atmosféricas, el efecto swiching (variaciones de frecuencia) o los problemas de suministro (la variación de tensión) se muestra en la Tabla 8, en el mismo se señala los controles de funcionamiento a realizar.

Tabla 8

Matriz de fallo por sobretensión externa, interna y presencia de armónicos

COMPONENTE	PROCESO	MODOS DE FALLO	EFEECTO	CAUSA	CONTROLES
ESTATOR	MANTTO DEL ESTATOR	SOBRETENSIÓN EXTERNA	PARADA DE MOTOR POR ACCIONAMIENTO DE SISTEMA DE PROTECCIÓN	DESCARGAS ATMOSFERICAS	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO, CORRECCIÓN DEL PROBLEMA, VERIFICACIÓN DE LA CAUSA
ESTATOR	MANTTO DEL ESTATOR	SOBRETENSIÓN INTERNA Y PRESENCIA DE ARMÓNICOS	PARADA DE MOTOR POR ACCIONAMIENTO DE SISTEMA DE PROTECCIÓN	EFEECTO SWICHING (VARIACIONES DE FRECUENCIA)	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO, CORRECCIÓN DEL PROBLEMA, VERIFICACIÓN DE LA CAUSA
ESTATOR	MANTTO DEL ESTATOR	SOBRETENSIÓN INTERNA	PARADA DE MOTOR POR ACCIONAMIENTO DE SISTEMA DE PROTECCIÓN	PROBLEMAS DE SUMINISTRO (VARIACIONES DE TENSIÓN)	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO, CORRECCIÓN DEL PROBLEMA, VERIFICACIÓN DE LA CAUSA

Nota. Desarrollado mediante revisión bibliográfica y entrevista.

En el suministro eléctrico los armónicos pueden ocasionar varios efectos negativos en el funcionamiento de un motor de inducción. Los armónicos son ondas de frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental de la red eléctrica (por ejemplo, si la frecuencia de la red es 60 Hz, los armónicos pueden ser de 120 Hz, 180 Hz, 240 Hz, etc.). Estos armónicos pueden causar una serie de problemas que afectan tanto al motor como a la red eléctrica en general.

A continuación, se detallan los efectos más comunes de los armónicos en los motores de inducción:

1. Sobrecarga de corriente

- **Descripción:** Los armónicos pueden causar un aumento en la corriente que fluye a través de los devanados del motor, ya que se superponen a la corriente de la frecuencia fundamental.
- **Consecuencias:** Esto puede provocar un aumento en la potencia demandada y una mayor generación de calor, lo que a su vez puede resultar en **sobrecarga térmica** y acortar la vida útil del motor.

2. Calentamiento excesivo

- **Descripción:** La presencia de armónicos puede hacer que el motor opere a corrientes más altas de lo que está diseñado, generando un exceso de calor.
- **Consecuencias:** El calor adicional puede dañar el aislamiento de los devanados disminuyendo los niveles dieléctricos de los materiales aislantes de los conductores y otros componentes, aumentando el riesgo de fallas prematuras y disminuyendo la eficiencia operativa del motor.

3. Pérdidas adicionales

- **Descripción:** Los armónicos pueden incrementar las pérdidas en el motor debido a la generación de calor adicional y a las **pérdidas de corrientes de Foucault** en el núcleo del motor.
- **Consecuencias:** Estas pérdidas adicionales reducen la eficiencia del motor y aumentan el consumo de energía, lo que incrementa los costos operativos y el impacto ambiental.

4. Ruidos y vibraciones anómalas

- **Descripción:** La presencia de armónicos puede generar un desbalance en las fuerzas electromagnéticas que actúan sobre el rotor y el estator, provocando vibraciones y ruidos inusuales.
- **Consecuencias:** Los ruidos y las vibraciones pueden afectar la vida útil de los componentes mecánicos, causar daños a la estructura y afectar la comodidad y seguridad de la operación.

5. Desempeño y torque inestables

- **Descripción:** Los armónicos pueden alterar la forma de la onda de corriente y de la onda de tensión, lo que lleva a una distribución de corriente no uniforme en el motor.

- **Consecuencias:** Esto puede hacer que el motor tenga un **desempeño ineficiente** y un **torque fluctuante**, lo que puede afectar la estabilidad y la capacidad de trabajo del motor en aplicaciones críticas.

6. Problemas de arranque y operación

- **Descripción:** Los armónicos pueden dificultar el arranque del motor y hacer que el motor opere de manera irregular durante su funcionamiento.
- **Consecuencias:** Esto puede provocar **fallas en el arranque** o **pérdidas de rendimiento** en condiciones de carga ligera o variable.

7. Interferencia con otros equipos eléctricos

- **Descripción:** Los armónicos no solo afectan al motor de inducción, sino que también pueden afectar a otros equipos conectados a la misma red eléctrica.
- **Consecuencias:** Pueden causar interferencias en equipos electrónicos, dispositivos de medición y otros motores, provocando malfuncionamientos o fallas.

8. Desgaste prematuro de componentes

- **Descripción:** Las vibraciones y el calor adicional causados por los armónicos pueden acelerar el desgaste de los componentes mecánicos y eléctricos del motor, incluyendo los rodamientos y el aislamiento de los devanados.
- **Consecuencias:** Esto puede resultar en un **mantenimiento más frecuente**, una mayor probabilidad de fallas mecánicas y una reducción en la vida útil del motor.

9. Causas de la presencia de armónicos en la red

- **Equipos electrónicos:** La presencia de equipos con fuentes de alimentación no lineales, como inversores, variadores de frecuencia, computadoras y dispositivos de control, pueden generar armónicos.
- **Carga no lineal:** Cargas como motores de inducción con arrancadores de autotransformador, equipos de soldadura eléctrica y otras máquinas industriales también pueden introducir armónicos en la red.
- **Factores de red:** Problemas en la distribución eléctrica y en la calidad de la energía de la red pueden contribuir a la generación y propagación de armónicos.

10. Medidas para mitigar los efectos de los armónicos

1. **Uso de filtros de armónicos:** Instalar filtros pasivos o activos en la red para reducir la cantidad de armónicos presentes.
2. **Diseño adecuado de sistemas eléctricos:** Seleccionar equipos con buena capacidad de manejo de armónicos y usar transformadores con características específicas para mitigar estos problemas.

3. **Monitoreo de calidad de energía:** Realizar mediciones periódicas para identificar los niveles de armónicos y tomar acciones correctivas si es necesario.
4. **Uso de dispositivos de compensación de armónicos:** Emplear dispositivos que puedan corregir los problemas de armónicos, como compensadores estáticos (SVC) y filtros de armónicos activos.

Conclusión

La presencia de armónicos en un motor de inducción puede tener efectos perjudiciales significativos, incluyendo sobrecargas de corriente, calentamiento excesivo, pérdida de eficiencia, ruidos y vibraciones anómalas, y problemas de desempeño. La identificación y mitigación de los armónicos es crucial para garantizar la operación eficiente y segura de los motores y otros equipos eléctricos, protegiendo así su vida útil y el rendimiento general del sistema.

4.2.4 Modo de fallo: Por fallo de aislamiento debido a la contaminación ambiental

La Tabla 9 muestra la Matriz de fallo del aislamiento por contaminación ambiental.

Tabla 9

Matriz de fallo por aislamiento II

COMPONENTE	PROCESO	MODOS DE FALLO	EFEECTO	CAUSA	CONTROLES
ESTATOR	MANTTO DEL ESTATOR	FALLO DEL AISLAMIENTO ELÉCTRICO POR CONTAMINACIÓN AMBIENTAL - I	DEGRADACIÓN Y PÉRDIDA DEL NIVEL DE AISLAMIENTO DE LOS CONDUCTORES ELÉCTRICOS	IP INADECUADO (INGRESS PROTECCIÓN) PROTECCIÓN DE LA CARCASA CONTRA HUMEDAD	IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS DE ENTRADA DE HUMEDAD, SELLADO Y USO DE MATERIALES ADECUADOS, INSPECCIONES DEL SELLADO
ESTATOR	MANTTO DEL ESTATOR	FALLO DEL AISLAMIENTO ELÉCTRICO POR CONTAMINACIÓN AMBIENTAL - II	DEGRADACIÓN Y PÉRDIDA DEL NIVEL DE AISLAMIENTO DE LOS CONDUCTORES ELÉCTRICOS	PROBLEMAS DE HUMEDAD POR PROBLEMAS EN LOS CALEFACTORES	IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS DE ENTRADA DE HUMEDAD, SELLADO Y USO DE MATERIALES ADECUADOS, INSPECCIONES DEL SELLADO
ESTATOR	MANTTO DEL ESTATOR	FALLO DEL AISLAMIENTO ELÉCTRICO POR CONTAMINACIÓN AMBIENTAL - III	DEGRADACIÓN Y PÉRDIDA DEL NIVEL DE AISLAMIENTO DE LOS CONDUCTORES ELÉCTRICOS	PERDIDA DE HERMETICIDAD DE LA CARCASA DEL ESTATOR CONTRA LA HUMEDAD	IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS DE ENTRADA DE HUMEDAD, SELLADO Y USO DE MATERIALES ADECUADOS, INSPECCIONES DEL SELLADO
ESTATOR	MANTTO DEL ESTATOR	FALLO DEL AISLAMIENTO ELÉCTRICO POR CONTAMINACIÓN AMBIENTAL - IV	DEGRADACIÓN Y PÉRDIDA DEL NIVEL DE AISLAMIENTO DE LOS COMPONENTES DEL ESTATOR	AFLORAMIENTO DE PARTES COMPONENTES DEL ESTATOR	IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS DE ENTRADA DE HUMEDAD, SELLADO Y USO DE MATERIALES ADECUADOS, INSPECCIONES DEL SELLADO

Nota. Desarrollado mediante revisión bibliográfica y entrevista.

1. Acumulación de partículas y suciedad

- **Descripción:** La acumulación de partículas como polvo, tierra, humo y otros contaminantes en el aire puede adherirse a las superficies del motor, particularmente en las entradas de aire y las áreas de refrigeración.

- **Consecuencias:**

- Reducción de la capacidad de disipación de calor del motor.
- Aumento de la temperatura de operación, lo que puede llevar al sobrecalentamiento.
- Disminución de la eficiencia operativa.

- **Prevención:**

- Instalar filtros de aire de alta calidad para evitar que el polvo y las partículas ingresen al motor.
- Realizar limpiezas regulares del motor y sus componentes.
- Ubicar los motores en áreas con control de polvo o en entornos cerrados donde la exposición a partículas sea mínima.

2. Corrosión

- **Descripción:** La corrosión es el deterioro de los componentes metálicos del motor debido a la exposición a agentes contaminantes como la humedad, gases industriales o agentes ácidos presentes en el aire.

- **Consecuencias:**

- Daño a los componentes metálicos internos, como el estator y el rotor.
- Reducción de la vida útil del motor y potencial fallo de los circuitos eléctricos.
- Posibles riesgos de cortocircuitos y fallos eléctricos.

- **Prevención:**

- Utilizar recubrimientos protectores en los componentes metálicos para hacerlos más resistentes a la corrosión.
- Mantener los motores en ambientes con baja humedad o controlar la humedad en áreas de uso.
- Realizar inspecciones periódicas para detectar signos de corrosión.

3. Problemas de aislamiento eléctrico

- **Descripción:** El aislamiento eléctrico del motor puede verse afectado por la acumulación de partículas y la presencia de humedad y agentes químicos. Esto compromete la capacidad de aislamiento de los bobinados, disminuyendo adicionalmente el tiempo de vida útil de los componentes eléctricos.

- **Consecuencias:**

- Incremento del riesgo de fallos eléctricos y cortocircuitos.
- Reducción en la resistencia de los bobinados y posible daño permanente a los componentes.
- Riesgo de incendios debido a fallos eléctricos.

- **Prevención:**

- Usar materiales de aislamiento de alta calidad que sean resistentes a contaminantes y humedad.
- Realizar pruebas de aislamiento regularmente para asegurarse de que las propiedades eléctricas estén intactas.
- Instalar sistemas de sellado en los motores para proteger el aislamiento de la humedad y la suciedad.

4. Desgaste de rodamientos

- **Descripción:** Las partículas abrasivas, como polvo y arena, pueden infiltrarse en los rodamientos y otras partes móviles, acelerando el desgaste de los componentes.

- **Consecuencias:**

- Aumento de la fricción y la vibración, lo que puede llevar al fallo de los rodamientos.
- Reducción de la vida útil de los componentes mecánicos del motor.
- Incremento de los costos de mantenimiento y tiempo de inactividad del motor.

- **Prevención:**

- Usar rodamientos con sellos de alta calidad que eviten la entrada de contaminantes.
- Mantener un programa de mantenimiento regular para inspeccionar y lubricar los rodamientos.
- Instalar barreras o filtros que limiten la cantidad de partículas en el ambiente de trabajo.

5. Pérdida de eficiencia

- **Descripción:** La suciedad, grasa y otros contaminantes en las partes móviles y la superficie del motor pueden aumentar la fricción y la resistencia, afectando la eficiencia de operación.

- **Consecuencias:**

- Consumo de más energía para realizar el mismo trabajo, lo que eleva los costos operativos.
- Mayor desgaste de los componentes internos debido a la fricción adicional.

- **Prevención:**

- Realizar limpiezas periódicas de las partes externas e internas del motor.
- Implementar programas de mantenimiento para asegurar que las partes móviles estén en condiciones óptimas.

- Revisar y cambiar los lubricantes de acuerdo a las especificaciones del fabricante y en intervalos regulares.

6. Sobre calentamiento

- **Descripción:** La obstrucción de los sistemas de ventilación y la acumulación de contaminantes pueden dificultar la disipación de calor del motor.
- **Consecuencias:**
 - Riesgo de daños permanentes a los componentes internos del motor.
 - Posibilidad de fallos eléctricos y reducción de la vida útil del motor.
- **Prevención:**
 - Hay que asegurar que los conductos de ventilación estén limpios y sin obstrucciones.
 - Instalar sistemas de monitoreo de temperatura para detectar sobrecalentamientos de manera temprana.
 - Ubicar los motores en lugares con circulación de aire adecuada y mantenerlos protegidos de fuentes de calor externas.

7. Riesgo de cortocircuitos y fallos eléctricos

- **Descripción:** La presencia de contaminantes líquidos o gases en el entorno puede provocar fallos eléctricos en los motores de inducción.
- **Consecuencias:**
 - Daños a los sistemas de control y a los componentes eléctricos.
 - Peligro de incendios o descargas eléctricas.
 - Costos asociados a reparaciones y pérdida de producción.
- **Prevención:**
 - Instalar sistemas de sellado para proteger el motor de líquidos y gases.
 - Utilizar materiales resistentes a la humedad y a la corrosión para las partes eléctricas.
 - Realizar revisiones periódicas para asegurarse de que no haya acumulación de contaminantes en los componentes eléctricos.

La prevención de estos problemas requiere un enfoque integral que combine mantenimiento regular, uso de materiales adecuados, monitoreo constante y medidas para minimizar la exposición a la contaminación ambiental.

4.2.5 Modo de fallo: Por sobrecarga

La tabla 10 muestra la Matriz de fallo del motor por sobrecarga cuyo efecto inmediato es la parada del motor por accionamiento del sistema de protección; las causas probables se

consideran la selección inadecuada del motor referida a su potencia. En algunos casos ocurre que el rotor puede encontrarse bloqueado o también puede estar en movimiento diferente al sentido normal. Para estos casos se evalúa la carga, el reemplazo, o se reconfigura el motor o se reajusta los sistemas de control. Asimismo, se analiza el régimen de operación del motor, verificando posibles incrementos de demanda mecánica no previstos en el diseño.

Tabla 10

Matriz de fallo por sobrecarga

COMPONENTE	PROCESO	MODOS DE FALLO	EFEECTO	CAUSA	CONTROLES
ESTATOR	MANTTO DEL ESTATOR	FALLO POR SOBRECARGA I	PARADA DE MOTOR POR ACCIONAMIENTO DE SISTEMA DE PROTECCIÓN	INADECUADA SELECCIÓN DEL MOTOR Y	EVALUAR LA CARGA, REEMPLAZO O RECONFIGURACIÓN DEL MOTOR, AJUSTE DE PARÁMETROS DE CONTROL
ESTATOR	MANTTO DEL ESTATOR	FALLO POR SOBRECARGA II	PARADA DE MOTOR POR ACCIONAMIENTO DE SISTEMA DE PROTECCIÓN	ROTOR BLOQUEADO	EVALUAR LA CARGA, REEMPLAZO O RECONFIGURACIÓN DEL MOTOR, AJUSTE DE PARÁMETROS DE CONTROL
ESTATOR	MANTTO DEL ESTATOR	FALLO POR SOBRECARGA III	PARADA DE MOTOR POR ACCIONAMIENTO DE SISTEMA DE PROTECCIÓN	ARRANQUE CON ROTOR EN MOVIMIENTO	EVALUAR LA CARGA, REEMPLAZO O RECONFIGURACIÓN DEL MOTOR, AJUSTE DE PARÁMETROS DE CONTROL

Nota. Desarrollado mediante revisión bibliográfica y entrevista.

La sobrecarga en motores de inducción ocurre cuando el motor opera a una carga mayor que la especificada para su diseño. Esto puede tener varias consecuencias negativas, tanto a corto como a largo plazo. A continuación, se describen los principales problemas, sus consecuencias y las medidas de prevención:

1. Sobrecalentamiento

- **Descripción:** Cuando el motor está sobrecargado, consume más corriente, lo que genera un aumento de calor debido a las pérdidas por efecto Joule en los devanados.
- **Consecuencias:**
 - Daño en el aislamiento de los devanados, reduciendo la vida útil del motor.
 - Riesgo de incendios por temperaturas excesivas.
 - Degradación de componentes internos, como cojinetes y rotor.
- **Prevención:**
 - Utilizar interruptores térmicos o relés de sobrecarga para desconectar el motor cuando la corriente supere el límite.

- Realizar un mantenimiento periódico para garantizar una buena ventilación y limpieza del motor.
- Asegurarse de que el motor esté dimensionado adecuadamente para la carga que va a manejar.

2. Reducción de la eficiencia

- **Descripción:** La sobrecarga fuerza al motor a operar fuera de su punto de máxima eficiencia, incrementando las pérdidas energéticas.
- **Consecuencias:**
 - Mayor consumo de energía eléctrica y aumento en los costos operativos.
 - Incremento de la huella de carbono debido al uso ineficiente de la energía.
- **Prevención:**
 - Ajustar correctamente la carga conectada al motor.
 - Implementar sistemas de monitoreo que midan continuamente la corriente y la potencia del motor.
 - Optar por motores de alta eficiencia certificados para aplicaciones específicas.

3. Desgaste mecánico acelerado

- **Descripción:** Una sobrecarga prolongada aumenta las tensiones mecánicas en componentes como rodamientos, ejes y sistemas de acoplamiento.
- **Consecuencias:**
 - Aumento de las vibraciones y el ruido, lo que puede provocar fallas en los cojinetes o daños en el rotor.
 - Mayor frecuencia de paradas no planificadas por fallas mecánicas.
- **Prevención:**
 - Utilizar sensores de vibración para detectar problemas mecánicos incipientes.
 - Garantizar un correcto alineamiento entre el motor y la máquina acoplada.
 - Reducir la carga a niveles seguros según las especificaciones del motor.

4. Pérdida de sincronismo o bloqueo del rotor

- **Descripción:** Bajo una sobrecarga extrema, el par resistente puede superar al par desarrollado por el motor, haciendo que el rotor se detenga.
- **Consecuencias:**
 - Corriente excesiva que puede dañar los devanados.
 - Riesgo de falla catastrófica en el motor.
- **Prevención:**
 - Configurar protecciones contra cortocircuitos y bloqueos de rotor.

- Supervisar el par de carga para evitar que supere los límites nominales del motor.
- Usar arrancadores suaves o variadores de frecuencia para gestionar mejor las condiciones de carga.

5. Fallas eléctricas

- **Descripción:** La corriente elevada durante la sobrecarga puede causar arcos eléctricos o cortocircuitos en los devanados.
- **Consecuencias:**
 - Falla permanente del motor debido a daños en los devanados.
 - Costos elevados por reparaciones o reemplazo.
- **Prevención:**
 - Inspeccionar regularmente los devanados para detectar signos de desgaste o daños.
 - Implementar un sistema de protección eléctrico que limite los picos de corriente.
 - Operar el motor dentro de sus límites especificados de corriente y carga.

En general, la clave para evitar problemas por sobrecarga en motores de inducción es realizar un dimensionamiento adecuado, implementar sistemas de protección y monitoreo, y llevar a cabo un mantenimiento preventivo regular.

Conclusión

La sobrecarga en los motores de inducción es una de las principales causas de fallas y pérdidas operativas en sistemas eléctricos y mecánicos. Las consecuencias pueden variar desde un simple aumento en el consumo energético hasta daños irreparables en el motor, con impactos económicos significativos.

Sin embargo, estos problemas pueden prevenirse mediante un diseño adecuado del sistema, el uso de protecciones eléctricas y mecánicas, y un mantenimiento preventivo riguroso.

Garantizar que el motor opere dentro de sus límites de diseño no solo prolonga su vida útil, sino que también mejora la eficiencia y confiabilidad del sistema. La combinación de monitoreo constante y soluciones proactivas es fundamental para minimizar los riesgos y maximizar el rendimiento del motor.

Si el motor tiene una operación con una carga predeterminada, es posible obtener una estadística de carga o una curva de operación de tal forma que se puede prevenir cargas peligrosas (sobrecarga) y formular soluciones inmediatas.

4.2.6 Modo de fallo: En el circuito magnético del estator

La Tabla 11 muestra la Matriz de fallo en el circuito magnético, específicamente en el estator, las posibles causas son los elevados esfuerzos electrodinámicos, los afloramientos de los sistemas de sujeción, la fricción, rozamiento o golpes. Por otra parte, los efectos se presentan en el incremento de los flujos de dispersión, la vibración y los ruidos.

Tabla 11

Matriz de fallo en el circuito magnético del estator.

COMPONENTE	PROCESO	MODOS DE FALLO	EFFECTO	CAUSA	CONTROLES
ESTATOR	MANTTO DEL ESTATOR	FALLO EN EL CIRCUITO MAGNETICO - I	INCREMENTO DE LOS FLUJOS DE DISPERSIÓN	ELEVADOS ESFUERZOS ELECTRODINÁMICOS	MEJORA DEL APILAMIENTO DE LÁMINAS, UTILIZACIÓN DE RECUBRIMIENTOS AISLANTES, OPTIMIZACIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LAS BOBINAS
ESTATOR	MANTTO DEL ESTATOR	FALLO EN EL CIRCUITO MAGNETICO - II	INCREMENTO DE LOS FLUJOS DE DISPERSIÓN	AFLORAMIENTO DE SISTEMAS DE SUJESIÓN	MEJORA DEL APILAMIENTO DE LÁMINAS, UTILIZACIÓN DE RECUBRIMIENTOS AISLANTES, OPTIMIZACIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LAS BOBINAS
ESTATOR	MANTTO DEL ESTATOR	FALLO EN EL CIRCUITO MAGNETICO - III	VIBRACIÓN Y RUIDO	FRICCIÓN, ROZAMIENTO O GOLPES	MEJORA DEL APILAMIENTO DE LÁMINAS, UTILIZACIÓN DE RECUBRIMIENTOS AISLANTES, OPTIMIZACIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LAS BOBINAS

Nota. Desarrollado mediante revisión bibliográfica y entrevista.

Los fallos en el circuito magnético del estator pueden ocasionar una variedad de problemas que afectan el rendimiento, la eficiencia y la vida útil de un motor de inducción. A continuación, se detallan los principales problemas asociados, sus consecuencias y las medidas de prevención:

1. Cortocircuito entre laminaciones

- **Descripción:** Las laminaciones del núcleo del estator están diseñadas para minimizar las corrientes parásitas mediante un recubrimiento aislante. Cuando este aislamiento se deteriora o daña, se generan cortocircuitos entre las laminaciones.
- **Consecuencias:**
 - Aumento de las pérdidas por corrientes parásitas y generación de calor excesivo.
 - Reducción de la eficiencia energética del motor.
 - Daños en el aislamiento de los devanados debido al sobrecalentamiento.
- **Prevención:**
 - Inspeccionar regularmente el núcleo del estator durante el mantenimiento.
 - Asegurar un manejo cuidadoso durante el ensamblaje y reparaciones del motor.
 - Reemplazar laminaciones dañadas y aplicar recubrimientos aislantes cuando sea necesario.

2. Desalineación o deformación del núcleo magnético

- **Descripción:** La desalineación o deformación del núcleo puede ocurrir por impactos mecánicos, instalación incorrecta o vibraciones excesivas.
- **Consecuencias:**
 - Desbalance en el flujo magnético, generando fuerzas desiguales y vibraciones.
 - Reducción del rendimiento electromagnético del motor.
 - Daño progresivo en otras partes del motor, como rodamientos y rotor.
- **Prevención:**
 - Realizar un montaje preciso del núcleo magnético y evitar golpes durante la instalación.
 - Usar sensores de vibración para detectar problemas mecánicos en etapa temprana.
 - Diseñar soportes robustos que minimicen las vibraciones durante la operación.

3. Saturación del circuito magnético

- **Descripción:** La saturación ocurre cuando el circuito magnético no puede soportar el nivel de flujo magnético generado por las corrientes del devanado, debido a materiales defectuosos o sobrecarga.
- **Consecuencias:**
 - Incremento de las pérdidas magnéticas y generación de calor.
 - Operación ineficiente con un bajo factor de potencia.
 - Riesgo de fallas en el aislamiento de los devanados.
- **Prevención:**
 - Seleccionar materiales de alta calidad y propiedades magnéticas adecuadas para el núcleo.
 - Dimensionar correctamente el motor para evitar sobrecargas.
 - Controlar los niveles de corriente mediante variadores de frecuencia o protecciones eléctricas.

4. Fisuras o grietas en el núcleo del estator

- **Descripción:** Las fisuras pueden generarse debido al envejecimiento del material, impactos mecánicos o ciclos térmicos extremos.
- **Consecuencias:**
 - Alteración del flujo magnético y generación de puntos calientes.
 - Vibraciones y ruido excesivo durante el funcionamiento.
 - Daños colaterales en el rotor o en el aislamiento del estator.

- **Prevención:**

- Inspeccionar periódicamente el núcleo para detectar fisuras o daños estructurales.
- Evitar ciclos de operación que generen temperaturas extremas y transiciones rápidas.
- Reparar o reemplazar el núcleo en caso de encontrar daños significativos.

5.- Pérdidas adicionales en el núcleo magnético

- **Descripción:** Daños en las laminaciones del núcleo del estator, como cortocircuitos entre las chapas, aumentan las pérdidas por corrientes parásitas y el efecto Joule.
- **Consecuencias:**
 - Sobre calentamiento del núcleo magnético.
 - Reducción en la eficiencia del motor.
 - Mayor desgaste en el aislamiento de los devanados, con riesgo de fallas eléctricas.
- **Prevención:**
 - Inspeccionar regularmente el núcleo del estator durante el mantenimiento.
 - Garantizar un ensamblaje correcto de las laminaciones y aplicar revestimientos aislantes de calidad.
 - Evitar impactos mecánicos o corrosión que dañen las chapas magnéticas.

Conclusión

Los fallos en el circuito magnético del estator tienen un impacto directo en la eficiencia, el rendimiento y la confiabilidad de los motores de inducción.

Los problemas como cortocircuitos entre laminaciones, desalineaciones, saturación y fisuras generan pérdidas adicionales, sobre calentamiento y riesgos de fallas catastróficas.

La prevención de estos problemas requiere un mantenimiento regular, el uso de materiales y diseños adecuados, y la implementación de monitoreo continuo durante la operación.

Estas acciones no solo prolongan la vida útil del motor, sino que también reducen costos operativos y mejoran la sostenibilidad energética.

4.3 MATRIZ DE FALLA EN EL ROTOR DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

4.3.1 Modo de fallo: En barra o jaula de ardilla del rotor

La Tabla 11 muestra la Matriz de fallo en las barras de la jaula de ardilla del rotor, se presenta por diferentes causas entre ellas tenemos la rotura de la barra por defecto del material, rotura de barra floja, rotura de barra por incorrecto régimen de arranque, fractura por defecto de soldadura; los efectos inmediatos son: ruidos anormales, sobre calentamiento y parada del motor.

Tabla 11

Matriz de fallo en la barra de la jaula de ardilla del rotor.

COMPONENTE	PROCESO	MODOS DE FALLO	EFEECTO	CAUSA	CONTROLES
ROTOR	MANTTO DEL ROTOR	FALLA EN BARRA - I	RUIDO ANORMALES	ROTURA DE BARRA POR DEFECTO DEL MATERIAL	REEMPLAZO DE LA BARRA DEL ROTOR, ANÁLISIS DE LA CAUSA RAÍZ, INSPECCIÓN DE LAS BARRAS RESTANTES, CALIDAD DEL MATERIAL
ROTOR	MANTTO DEL ROTOR	FALLA EN BARRA - II	SOBRECALENTAMIENTO Y PARADA DEL MOTOR	ROTURA DE BARRA FLOJA	REEMPLAZO DE LA BARRA DEL ROTOR, ANÁLISIS DE LA CAUSA RAÍZ, INSPECCIÓN DE LAS BARRAS RESTANTES, CALIDAD DEL MATERIAL
ROTOR	MANTTO DEL ROTOR	FALLA EN BARRA - III	SOBRECALENTAMIENTO Y PARADA DEL MOTOR	ROTURA DE BARRA POR INCORRECTO RÉGIMEN DE ARRANQUE	REEMPLAZO DE LA BARRA DEL ROTOR, ANÁLISIS DE LA CAUSA RAÍZ, INSPECCIÓN DE LAS BARRAS RESTANTES, CALIDAD DEL MATERIAL
ROTOR	MANTTO DEL ROTOR	FALLA EN BARRA - IV	SOBRECALENTAMIENTO Y PARADA DEL MOTOR	FRACTURA POR DEFECTO DE SOLDADURA	REEMPLAZO DE LA BARRA DEL ROTOR, ANÁLISIS DE LA CAUSA RAÍZ, INSPECCIÓN DE LAS BARRAS RESTANTES, CALIDAD DEL MATERIAL

Nota. Desarrollado mediante revisión bibliográfica y entrevista.

La ruptura de las barras de la jaula de ardilla del rotor en motores de inducción puede generar una serie de problemas que afectan la eficiencia, estabilidad y durabilidad del motor. A continuación, se presentan los principales problemas, sus consecuencias y medidas de prevención:

1. Desequilibrio del campo magnético

- **Descripción:** Una barra rota o desconectada impide que se generen corrientes inducidas de manera uniforme en el rotor, causando un desequilibrio en el campo magnético.
- **Consecuencias:**
 - Generación de par oscilante, lo que provoca vibraciones y ruido durante la operación.
 - Disminución del rendimiento y la eficiencia del motor.
 - Riesgo de daños mecánicos colaterales en el rotor y los cojinetes.
 - Desplazamiento del eje magnético del flujo magnético del rotor
- **Prevención:**
 - Monitorear el par y las vibraciones del motor mediante sensores y sistemas de diagnóstico.
 - Realizar inspecciones periódicas utilizando pruebas específicas como el análisis de corriente de estator (MCSA).

- Asegurar un diseño robusto de las barras y el anillo de cortocircuito durante la fabricación.

2. Sobrecalentamiento localizado

- **Descripción:** Una barra rota afecta el flujo de corriente en el rotor, aumentando las pérdidas por efecto Joule en las barras restantes y en el anillo de cortocircuito.
- **Consecuencias:**
 - Generación de puntos calientes en el rotor.
 - Incremento del desgaste en los componentes mecánicos y eléctricos.
 - Posible fusión del anillo de cortocircuito si las corrientes exceden el límite soportado.
- **Prevención:**
 - Implementar sistemas de monitoreo térmico para detectar incrementos anómalos de temperatura.
 - Usar materiales de alta calidad con buena conductividad y resistencia al calor para las barras y el anillo.
 - Realizar un mantenimiento preventivo y reparaciones antes de que el daño sea irreversible.

3. Pérdida de potencia y eficiencia

- **Descripción:** Las barras rotas disminuyen la capacidad del rotor para generar el par necesario para el funcionamiento del motor.
- **Consecuencias:**
 - Disminución del rendimiento del motor, con un aumento del consumo de energía.
 - Posibilidad de paradas inesperadas debido a la incapacidad del motor para mantener la carga.
 - Incremento de los costos operativos y de mantenimiento.
- **Prevención:**
 - Dimensionar correctamente el motor para la carga específica que debe manejar.
 - Evitar sobrecargas y arranques frecuentes que sometan al rotor a tensiones mecánicas elevadas.
 - Utilizar arrancadores suaves o variadores de frecuencia para minimizar tensiones durante el arranque.

4. Vibraciones excesivas

- **Descripción:** Una barra rota genera fuerzas desiguales en el rotor, aumentando las vibraciones del motor.

- **Consecuencias:**

- Incremento del desgaste en cojinetes, ejes y otros componentes mecánicos.
- Aceleración del deterioro de los devanados del estator debido al desbalance magnético.
- Mayor probabilidad de fallas catastróficas si no se corrige el problema.

- **Prevención:**

- Usar equipos de análisis de vibraciones para identificar anomalías en etapas tempranas.
- Garantizar un correcto alineamiento del motor durante la instalación.
- Realizar pruebas de carga regularmente para detectar posibles desbalances.

Conclusión

La ruptura de las barras de la jaula de ardilla del rotor representa un problema crítico en motores de inducción, ya que afecta tanto el rendimiento como la integridad mecánica del motor. Este tipo de fallas genera desequilibrios magnéticos, sobrecalentamiento, pérdida de eficiencia y un aumento significativo de las vibraciones.

La prevención de estos problemas requiere un enfoque integral que combine inspecciones periódicas, monitoreo continuo de vibraciones y temperatura, y el uso de materiales de alta calidad. Además, una operación dentro de los límites de diseño del motor y un mantenimiento preventivo adecuado pueden reducir significativamente el riesgo de estas fallas, garantizando un funcionamiento confiable y eficiente.

4.3.2 Modo de fallo: Daño en acero activo o material magnético del rotor

La Tabla 12 muestra la Matriz de fallo en el material ferromagnético del rotor, es decir en los bloques de láminas del rotor.

Las causas comunes de este fallo son las fricciones por golpes accidentales, la fricción por fricción por cuñas sueltas o fricción por falla en los rodamientos, aspectos generalmente de origen mecánico; los efectos por supuesto son los ruidos anormales e incremento de temperatura y en muchos casos un sobrecalentamiento y consecuente parada del motor. Luego el fallo de esta componente ocasiona un conjunto de problemas colaterales que se resumen en el siguiente Tabla 12.

Tabla 12

Matriz de fallo en acero activo o circuito magnético del rotor

COMPONENTE	PROCESO	MODOS DE FALLO	EFEECTO	CAUSA	CONTROLES
ROTOR	MANTTO DEL ROTOR	DAÑO ACERO ACTIVO - I	RUIDOS ANORMALES E INCREMENTO DE TEMPERATURA	FRICCIÓN POR GOLPES ACCIDENTALES	IDENTIFICACIÓN DE ZONA DE DAÑO, MAYOR SEGURIDAD DE MANIOBRA
ROTOR	MANTTO DEL ROTOR	DAÑO ACERO ACTIVO - II	RUIDOS ANORMALES E INCREMENTO DE TEMPERATURA	FRICCIÓN POR CUÑAS SUELTAS	IDENTIFICACIÓN DE ZONA DE DAÑO, AJUSTAR LAS CUÑAS O CAMBIARLAS
ROTOR	MANTTO DEL ROTOR	DAÑO ACERO ACTIVO - III	RUIDOS ANORMALES E INCREMENTO DE TEMPERATURA	FRICCIÓN POR FALLA EN RODAMIENTOS	REVISAR CARGA, TEMPERATURA DEL RODAMIENTO, VER PROCEDIMIENTO DE MANTTO DEL RODAMIENTO
ROTOR	MANTTO DEL ROTOR	DAÑO ACERO ACTIVO - IV	SOBRECALENTAMIENTO Y PARADA DEL MOTOR	FALLO POR ARCO EN BARRA ROTA Y FLOJA	CAMBIO DE COMPONENTE DAÑADO, REVISIÓN DE LAS DEMAS COMPONENTES.

Nota. Desarrollado mediante revisión bibliográfica y entrevista.

Los fallos en el circuito magnético del rotor de un motor de inducción pueden afectar severamente su desempeño, generando problemas electromagnéticos, mecánicos y térmicos. A continuación, se describen los principales problemas, sus consecuencias y las estrategias de prevención, así como una conclusión al respecto.

1. Pérdida de continuidad magnética por fisuras o grietas en el núcleo

- **Descripción:** Las fisuras o grietas en el núcleo del rotor, generalmente causadas por vibraciones, esfuerzos mecánicos o ciclos térmicos repetidos, interrumpen el flujo magnético continuo.
- **Consecuencias:**
 - Reducción de la capacidad del rotor para inducir corriente y generar par motor.
 - Aumento de las vibraciones
 - Incremento del ruido.
 - Degradación progresiva del núcleo y del sistema en general.
- **Prevención:**
 - Realizar inspecciones regulares del núcleo durante los periodos de mantenimiento.
 - Evitar operaciones bajo condiciones de carga extrema o desequilibrada.
 - Diseñar los núcleos con materiales ferromagnéticos de mayor resistencia mecánica
 - Fabricar el núcleo con materiales resistentes a ciclos térmicos y mecánicos.

2. Saturación magnética en el rotor

- **Descripción:** La saturación ocurre cuando el circuito magnético del rotor no puede manejar el flujo magnético generado, generalmente debido a un diseño inadecuado, una sobrecarga o fallos en los materiales.

- **Consecuencias:**
 - Incremento en las pérdidas magnéticas, generando calor excesivo.
 - Disminución del rendimiento y del factor de potencia.
 - Posibilidad de dañar el estator debido a un desbalance magnético.
- **Prevención:**
 - Dimensionar correctamente el rotor para las condiciones de carga y la potencia del motor.
 - Usar materiales con propiedades magnéticas adecuadas y de alta calidad.
 - Evitar sobrecargas prolongadas y controlar la corriente mediante variadores de frecuencia.

3. Desprendimiento o deformación de las laminaciones

- **Descripción:** Las laminaciones del rotor, que están diseñadas para minimizar las corrientes parásitas, pueden desprenderse o deformarse debido a impactos mecánicos o defectos de fabricación.
- **Consecuencias:**
 - Aumento de las pérdidas por corrientes parásitas y generación de calor.
 - Desbalance magnético que incrementa las vibraciones y el desgaste mecánico.
 - Posible daño en los cojinetes y en el estator.
- **Prevención:**
 - Garantizar un ensamblaje preciso y un manejo cuidadoso del rotor.
 - Realizar controles de calidad estrictos durante la fabricación.
 - Reparar o reemplazar laminaciones dañadas durante el mantenimiento.

4. Corrientes parásitas excesivas

- **Descripción:** Las corrientes parásitas pueden aumentar si las propiedades magnéticas del núcleo se ven afectadas por daños o defectos.
- **Consecuencias:**
 - Sobrecalentamiento localizado en el rotor.
 - Reducción de la eficiencia energética del motor.
 - Mayor riesgo de daño en el aislamiento de las barras de la jaula.
- **Prevención:**
 - Usar laminaciones con recubrimientos aislantes de alta calidad.
 - Diseñar el núcleo para minimizar las pérdidas por corrientes parásitas.
 - Monitorear la temperatura del rotor durante la operación.

5. Daño por impactos o vibraciones excesivas

- **Descripción:** Las vibraciones mecánicas o los impactos pueden causar deformaciones o daños estructurales en el circuito magnético del rotor.
- **Consecuencias:**
 - Fallas prematuras en el núcleo y otros componentes del rotor.
 - Aumento de las vibraciones y el ruido en el motor.
 - Riesgo de parada no planificada o daño catastrófico.
- **Prevención:**
 - Implementar sistemas de monitoreo de vibraciones.
 - Alinear correctamente el rotor y el estator durante la instalación.
 - Garantizar un soporte mecánico adecuado para reducir el impacto de las vibraciones.

Conclusión

Los fallos en el circuito magnético del rotor pueden comprometer significativamente el rendimiento y la confiabilidad de un motor de inducción. Problemas como fisuras, saturación, deformaciones y corrientes parásitas excesivas generan pérdidas energéticas, sobrecalentamiento, vibraciones y fallas mecánicas.

La prevención de estos problemas depende de un diseño y fabricación adecuados, un mantenimiento regular y el monitoreo continuo de las condiciones de operación del motor. Detectar problemas en etapas tempranas no solo reduce los costos de reparación, sino que también extiende la vida útil del motor y asegura un funcionamiento eficiente y seguro; además, permite planificar intervenciones oportunas que eviten paradas no programadas y pérdidas en la continuidad del proceso. Estas acciones contribuyen a la optimización del desempeño del equipo y a la reducción del riesgo operativo, formando parte del mantenimiento preventivo que garantiza la confiabilidad operativa del motor trifásico de inducción.

4.3.3 Modo de fallo: Fractura o flexión del eje

La Tabla 13 muestra la Matriz de fallo que corresponde a la fractura del eje o en otros casos una posible flexión o pérdida de linealidad sea horizontal o vertical, las causas son el exceso de carga y en otros casos la concentración de diversas fuerzas incidentes en el eje.

Tabla 13*Matriz de fallo en fractura del eje del rotor*

COMPONENTE	PROCESO	MODOS DE FALLO	EFEECTO	CAUSA	CONTROLES
ROTOR	MANTTO DEL ROTOR	FRACTURA O FLEXIÓN DEL EJE - I	CALENTAMIENTO Y PARADA DEL MOTOR	CONCENTRACIÓN DE TENSIONES	REVISAR LA CARGA, CAMBIO DE MOTOR
ROTOR	MANTTO DEL ROTOR	FRACTURA O FLEXIÓN DEL EJE - II	CALENTAMIENTO Y PARADA DEL MOTOR	EXCESO DE CARGA	REVISAR LA CARGA, CAMBIO DE MOTOR

La fractura o flexión del eje en un motor de inducción es un problema crítico que afecta directamente el funcionamiento, la estabilidad y la vida útil del motor.

Este tipo de falla puede ser causado por diversas razones, como esfuerzos excesivos, defectos de fabricación, o un mantenimiento inadecuado. A continuación, se analizan los problemas asociados, sus consecuencias y las estrategias de prevención, seguidos de una conclusión.

1. Fractura del eje

- **Descripción:** Ocurre cuando el eje se rompe debido a cargas excesivas, ciclos repetitivos de fatiga, defectos en el material o impactos repentinos.
- **Consecuencias:**
 - Parada inmediata del motor, afectando la producción o el proceso en el que se utiliza.
 - Daño secundario a componentes adyacentes, como cojinetes, rotor y acoplamientos.
 - Reparaciones costosas.
 - Necesidad de reemplazar el motor completo.
- **Prevención:**
 - Realizar análisis de esfuerzos en la etapa de diseño para dimensionar adecuadamente el eje.
 - Utilizar materiales de alta resistencia mecánica y fatiga.
 - Evitar condiciones de sobrecarga y manejar cuidadosamente el motor durante la instalación y el uso.
 -

2. Flexión del eje

- **Descripción:** La flexión ocurre cuando el eje se deforma debido a una distribución desigual de cargas, alineación incorrecta o un acoplamiento defectuoso.
- **Consecuencias:**
 - Generación de vibraciones y ruidos anormales durante la operación.
 - Desgaste acelerado de los cojinetes y los componentes mecánicos asociados.

- Posible daño en el rotor y el estator debido a la falta de alineación.
- **Prevención:**
 - Verificar la alineación entre el eje y los equipos acoplados durante la instalación.
 - Usar sistemas de acoplamiento flexibles que absorban desalineaciones menores.
 - Realizar inspecciones periódicas del eje para detectar signos de deformación.

3. Sobrecarga mecánica

- **Descripción:** Se produce cuando el eje se somete a fuerzas superiores a las especificaciones de diseño, como par torsional elevado o cargas axiales inadecuadas.
- **Consecuencias:**
 - Incremento del riesgo de fractura o deformación permanente del eje.
 - Disminución de la vida útil del motor y los acoplamientos.
 - Deterioro del rendimiento general del sistema.
- **Prevención:**
 - Dimensionar correctamente el motor y el eje para la carga que debe manejar.
 - Monitorear las condiciones de operación para evitar sobrecargas.
 - Implementar dispositivos de protección mecánica, como limitadores de par.

4. Desalineación y desequilibrio

- **Descripción:** La desalineación entre el eje del motor y los equipos acoplados, o un desequilibrio en el rotor, puede generar esfuerzos adicionales en el eje.
- **Consecuencias:**
 - Aumento de las tensiones mecánicas.
 - Incrementa la probabilidad de fracturas o flexión.
 - Vibraciones excesivas, que pueden dañar otros componentes del motor.
 - Pérdida de eficiencia y posibles paradas no planificadas.
- **Prevención:**
 - Asegurar una instalación precisa y una alineación adecuada del sistema.
 - Equilibrar correctamente el rotor durante el ensamblaje o las reparaciones.
 - Realizar monitoreos continuos con sensores de vibración y diagnóstico.

Conclusión

La fractura o flexión del eje en motores de inducción es un problema grave que puede derivar en paradas inesperadas, daños secundarios y costos elevados de reparación. Estas fallas generalmente son el resultado de esfuerzos excesivos, desalineaciones, desequilibrios o materiales de baja calidad.

Prevenir estos problemas requiere una combinación de buenas prácticas de diseño, instalación y mantenimiento. Esto incluye usar materiales adecuados, monitorear las condiciones de operación y garantizar una alineación precisa. Adoptar un enfoque proactivo puede minimizar riesgos, prolongar la vida útil del motor y reducir costos asociados a fallas mecánicas críticas.

4.3.4 Modo de fallo: Pérdidas de ajuste en la zona del rodamiento

La Tabla 14 muestra la Matriz de fallo que corresponde a las pérdidas de ajuste en la zona del rodamiento a consecuencia del deslizamiento o ajuste inadecuado del rodamiento, ocasionando ruidos anormales y disminución del par y la velocidad.

Tabla 14

Matriz de fallo por las pérdidas de ajuste en la zona de rodamiento

COMPONENTE	PROCESO	MODOS DE FALLO	EFEECTO	CAUSA	CONTROLES
ROTOR	MANTTO DEL ROTOR	PÉRDIDAS DE AJUSTE EN ZONA DE RODAMIENTO - I	RUIDOS ANORMALES Y DISMINUCIÓN DE LA VELOCIDAD	DESLIZAMIENTO DEL RODAMIENTO	REVISAR LA CARGA, AJUSTE DEL RODAMIENTO
ROTOR	MANTTO DEL ROTOR	PÉRDIDAS DE AJUSTE EN ZONA DE RODAMIENTO - II	RUIDOS ANORMALES Y DISMINUCIÓN DE LA VELOCIDAD	AJUSTE INADECUADO DEL RODAMIENTO	REVISAR LA CARGA, AJUSTE DEL RODAMIENTO

Nota. Desarrollado mediante revisión bibliográfica y entrevista.

Los fallos por pérdida de ajuste en la zona de los rodamientos del motor de inducción son problemas mecánicos que afectan la estabilidad y el desempeño del motor.

Estas fallas pueden generarse por desgaste, instalación incorrecta o sobrecargas, y suelen ocasionar daños colaterales si no se detectan y corrigen a tiempo.

A continuación, se presentan las principales causas, consecuencias, estrategias de prevención y una conclusión respecto a las pérdidas de ajuste en la zona de rodamiento.

1. Desgaste del alojamiento de los rodamientos

- **Descripción:** Ocurre cuando las superficies de contacto entre el rodamiento y su alojamiento se desgastan debido a cargas excesivas, vibraciones, o falta de lubricación adecuada.
- **Consecuencias:**
 - Movimiento libre o juego del rodamiento, lo que genera inestabilidad en el eje.
 - Aumento de las vibraciones y ruido durante el funcionamiento.
 - Desgaste prematuro del rodamiento y de otras piezas relacionadas, como el eje.
- **Prevención:**
 - Verificar periódicamente el estado de los alojamientos y los rodamientos.
 - Aplicar lubricación adecuada según las especificaciones del fabricante.
 - Diseñar los alojamientos con tolerancias precisas y materiales resistentes al desgaste.

2. Ajuste inadecuado del rodamiento

- **Descripción:** Un ajuste demasiado flojo o demasiado apretado entre el rodamiento y su alojamiento puede producir tensiones mecánicas anómalas.
- **Consecuencias:**
 - En el caso de un ajuste flojo, el rodamiento puede girar en su alojamiento, causando daños por fricción.
 - Un ajuste excesivamente apretado puede generar deformaciones en el rodamiento, reduciendo su vida útil.
 - En ambos casos, se reduce la eficiencia del motor y aumenta el riesgo de falla.
- **Prevención:**
 - Garantizar que los ajustes de los rodamientos cumplan con las tolerancias recomendadas por el fabricante.
 - Usar herramientas de instalación adecuadas para evitar daños durante el montaje.
 - Realizar inspecciones de ajuste durante el mantenimiento preventivo.

3. Desalineación del rodamiento

- **Descripción:** Una instalación incorrecta o deformaciones en el alojamiento pueden causar que el rodamiento quede desalineado respecto al eje y las otras partes del motor.
- **Consecuencias:**
 - Generación de vibraciones y ruido excesivo.
 - Incremento de las tensiones internas en el rodamiento, acelerando su desgaste.
 - Posible daño al eje y al alojamiento por esfuerzos no uniformes.
- **Prevención:**
 - Alinear correctamente los rodamientos durante la instalación y el montaje del motor.
 - Utilizar herramientas de alineación láser para mayor precisión.
 - Monitorear las vibraciones y temperaturas del motor para detectar desalineaciones.

4. Fatiga por cargas excesivas

- **Descripción:** Las cargas axiales o radiales elevadas pueden exceder la capacidad de diseño del rodamiento, generando deformaciones y pérdida de ajuste en el alojamiento.
- **Consecuencias:**
 - Reducción significativa de la vida útil del rodamiento.
 - Daño progresivo en el alojamiento y el eje.
 - Fallos mecánicos que pueden ocasionar la parada del motor.

- **Prevención:**

- Seleccionar rodamientos adecuados para la carga específica del motor.
- Implementar dispositivos de protección contra sobrecargas.
- Evitar cargas desequilibradas mediante un diseño correcto y el monitoreo continuo.

Conclusión

La pérdida de ajuste en la zona de los rodamientos es un problema crítico que puede afectar la estabilidad, eficiencia y confiabilidad de los motores de inducción. Sus causas incluyen desgaste, ajustes inadecuados, desalineación y fatiga mecánica, y pueden tener consecuencias graves como vibraciones, ruido, desgaste prematuro y paradas inesperadas.

Prevenir estos problemas requiere un enfoque integral que combine mantenimiento preventivo, un diseño adecuado y el uso de herramientas y técnicas modernas para el montaje y monitoreo. Detectar y corregir problemas en etapas tempranas no solo evita fallas catastróficas, sino que también asegura un funcionamiento eficiente y prolonga la vida útil del motor y sus componentes.

4.3.5 Modo de fallo: Por desbalance

La Tabla 15 muestra el modo de fallo por desbalance fundamentalmente en el rotor, se deben a la flexión del eje por la carga, al desplazamiento de masas, a los residuos de rebabas de fábrica o defectos de manufactura, los efectos son principalmente ruidos anormales e incremento de temperatura en el motor, muchas veces los fabricantes al detectar este error balancean la masa.

Tabla 15

Modo de fallo por desbalance

COMPONENTE	PROCESO	MODOS DE FALLO	EFFECTO	CAUSA	CONTROLES
ROTOR	MANTTO DEL ROTOR	DESBALANCE - I	RUIDOS ANORMALES E INCREMENTO DE TEMPERATURA	FLEXIÓN	REVISAR LA CARGA, BALANCEO DEL ROTOR RODAMIENTO
ROTOR	MANTTO DEL ROTOR	DESBALANCE - II	RUIDOS ANORMALES E INCREMENTO DE TEMPERATURA	DESPLAZAMIENTO DE MASAS	REVISAR LA CARGA, BALANCEO DEL ROTOR
ROTOR	MANTTO DEL ROTOR	DESBALANCE - III	RUIDOS ANORMALES E INCREMENTO DE TEMPERATURA	RESIDUAL DE FÁBRICA	REVISAR EL ROTOR, RETIRAR LOS RESIDUALES Y LAS REBABAS

Nota. Desarrollado mediante revisión bibliográfica y entrevista.

Los fallos por desbalance en el rotor de un motor de inducción son una causa común de problemas en el rendimiento y la vida útil del motor. Este desbalance puede originarse por defectos de fabricación, desgaste, acumulación de suciedad o daños mecánicos.

A continuación, se describen las principales causas, sus consecuencias, estrategias de prevención y una conclusión:

1. Vibraciones excesivas

- **Descripción:** Un rotor desbalanceado genera fuerzas centrífugas desiguales durante el giro, causando vibraciones anormales en el motor.
- **Consecuencias:**
 - Incremento del desgaste en cojinetes, ejes y otros componentes mecánicos.
 - Mayor probabilidad de fallos en el aislamiento del estator debido a movimientos y tensiones mecánicas.
 - Ruido excesivo durante la operación, afectando el entorno de trabajo.
- **Prevención:**
 - Equilibrar dinámicamente el rotor durante la fabricación y después de reparaciones.
 - Realizar monitoreo periódico de vibraciones para identificar problemas tempranamente.
 - Mantener una instalación adecuada del motor, asegurando una base estable y nivelada.

2. Desgaste desigual del rotor

- **Descripción:** El desbalance puede provocar que ciertas áreas del rotor sufran mayor desgaste, afectando la simetría y empeorando el problema con el tiempo.
- **Consecuencias:**
 - Disminución de la eficiencia del motor debido a un aumento en las pérdidas mecánicas.
 - Daño progresivo en los cojinetes y en el núcleo del rotor.
 - Posibilidad de fallas mecánicas graves si no se corrige.
- **Prevención:**
 - Inspeccionar regularmente el estado del rotor y sus componentes.
 - Limpiar y eliminar acumulaciones de suciedad o residuos que puedan causar desbalance.
 - Usar sistemas de lubricación adecuados para reducir el desgaste en cojinetes.

3. Pérdida de estabilidad en el funcionamiento

- **Descripción:** El desbalance del rotor genera fluctuaciones en el campo magnético, lo que puede afectar la estabilidad eléctrica del motor.
- **Consecuencias:**
 - Variaciones en el par motor, que afectan el rendimiento y la carga conectada.
 - Mayor consumo de energía debido a la ineficiencia operativa.

- Riesgo de daño al sistema de alimentación eléctrica por corrientes irregulares.
- **Prevención:**
 - Realizar análisis de vibraciones y monitoreo del consumo de corriente para detectar anomalías.
 - Verificar la uniformidad y la calidad de las barras de la jaula de ardilla.
 - Asegurar que las reparaciones o reemplazos de componentes del rotor mantengan la simetría original.

4. Fatiga y fractura en componentes del rotor

- **Descripción:** Las vibraciones y esfuerzos inducidos por el desbalance aumentan el estrés en componentes del rotor, acelerando su desgaste y posibles fracturas.
- **Consecuencias:**
 - Fallos mecánicos graves que pueden derivar en paradas no planificadas.
 - Daños colaterales al estator y a otros componentes mecánicos.
 - Incremento en los costos de reparación y mantenimiento.
- **Prevención:**
 - Diseñar el rotor con materiales de alta calidad y resistencia a la fatiga.
 - Implementar controles estrictos de calidad durante la fabricación del rotor.
 - Monitorear continuamente la operación del motor con sistemas de diagnóstico avanzados.

Conclusión

El desbalance en el rotor del motor de inducción es un problema que afecta tanto el rendimiento como la durabilidad del motor. Sus principales consecuencias incluyen vibraciones excesivas, desgaste desigual, pérdida de estabilidad operativa y fatiga en los componentes. Estos problemas no solo generan costos adicionales por mantenimiento y reparaciones, sino que también afectan la eficiencia y la confiabilidad del sistema.

Prevenir el desbalance requiere un enfoque integral que combine un diseño adecuado, un mantenimiento periódico y el monitoreo constante del motor. Detectar y corregir el desbalance a tiempo es esencial para garantizar un funcionamiento seguro, eficiente y prolongado del motor y sus componentes.

4.3.6 Modo de fallo: Por daños en el núcleo magnético del rotor.

La Tabla 16 nos muestra el modo de fallo por daños en el núcleo magnético del rotor, los mismos pueden surgir por diversas causas y generan consecuencias significativas en el rendimiento y la vida útil del equipo. Este análisis aborda los principales tipos de fallos en el núcleo magnético,

su descripción, las consecuencias asociadas y las estrategias de prevención específicas. Además, se presentan conclusiones generales sobre el impacto de estos problemas.

Tabla 16

Modo de fallo por daños en el núcleo magnético del rotor.

COMPONENTE	PROCESO	MODOS DE FALLO	EFFECTO	CAUSA	CONTROLES
ROTOR	MANTTO DEL ROTOR	DAÑOS EN EL NÚCLEO MAGNÉTICO DEL ROTOR	RUIDOS ANORMALES E INCREMENTO DE TEMPERATURA	ROZAMIENTO DEL ROTOR DESVIACIÓN DEL ENTREHIERRO	REVISAR LA CARGA, BALANCEO DEL ROTOR, REVISAR RODAMIENTO

Nota. Desarrollado mediante revisión bibliográfica y entrevista.

1. Deslaminación del Núcleo Magnético

- **Descripción**

La deslaminación ocurre cuando las láminas del núcleo, que están diseñadas para minimizar las corrientes parásitas, pierden su unión debido a vibraciones, impactos mecánicos, corrosión o fallos en el aislamiento interlaminar.

- **Consecuencia**

- Incremento de Corrientes Parásitas: La falta de aislamiento entre las láminas genera corrientes que aumentan las pérdidas energéticas.
- Sobre calentamiento: Estas pérdidas adicionales elevan la temperatura del rotor, dañando otros componentes.
- Reducción de la Eficiencia: Disminuye la capacidad del motor para convertir energía eléctrica en mecánica.

- **Prevención**

- Materiales de Alta Calidad: Utilizar núcleos con láminas de acero de baja pérdida magnética y recubrimientos resistentes.
- Inspecciones Periódicas: Detectar deslaminaciones mediante análisis visual o pruebas de corriente de Foucault.
- Diseño Antivibraciones: Implementar sistemas que reduzcan vibraciones durante la operación.

2. Daño por Sobrecarga Magnética

- **Descripción**

Las sobrecargas magnéticas ocurren cuando el motor opera por encima de sus especificaciones nominales, lo que puede saturar el núcleo magnético. Esto sucede, por ejemplo, en condiciones de arranque frecuente o sobrecarga eléctrica.

- **Consecuencia**
 - Saturación Magnética: La saturación reduce la capacidad del núcleo para transferir flujo magnético.
 - Pérdida de Torque: El motor no puede generar suficiente fuerza para operar correctamente.
 - Fallo Prematuro: El calor generado por la sobrecarga puede acelerar el deterioro del núcleo y otros componentes.
- **Prevención**
 - Dimensionamiento Adecuado: Asegurar que el motor seleccionado cumpla con las demandas de la aplicación.
 - Protección Eléctrica: Instalar dispositivos que limiten las sobrecargas, como relés térmicos.
 - Monitoreo de Parámetros: Supervisar corrientes y cargas operativas para evitar condiciones extremas.

3. Fisuras o Deformaciones Mecánicas

- **Descripción**

Fisuras o deformaciones pueden ocurrir debido a esfuerzos mecánicos excesivos, como desalineaciones del rotor, impactos durante la instalación o uso prolongado sin mantenimiento adecuado.

- **Consecuencia**
 - Desequilibrio Rotacional: Genera vibraciones que afectan el funcionamiento del motor.
 - Pérdida de Propiedades Magnéticas: El daño físico altera la continuidad del flujo magnético, reduciendo el rendimiento.
 - Desgaste Prematuro de Componentes: Vibraciones aumentan el desgaste en rodamientos y otros sistemas.
- **Prevención**
 - Procedimientos de Instalación: Capacitar al personal en el manejo correcto del rotor.
 - Monitoreo de Vibraciones: Detectar irregularidades antes de que causen daños mayores.
 - Inspección con Ultrasonido: Identificar fisuras internas no visibles a simple vista.

4. Corrosión en el Núcleo Magnético

- **Descripción**

La exposición a ambientes húmedos, contaminantes químicos o falta de recubrimientos protectores puede provocar corrosión en el núcleo magnético del rotor.

- **Consecuencia**

- Pérdida de Material: Reduce el área efectiva del núcleo y altera su capacidad magnética.
- Aumento de Pérdidas Energéticas: Las propiedades magnéticas se degradan, reduciendo la eficiencia.
- Paradas No Planificadas: La corrosión puede llevar a fallos imprevistos en el motor.

- **Prevención**

- Recubrimientos Protectores: Aplicar barnices o pinturas resistentes a la corrosión.
- Condiciones Controladas: Operar el motor en ambientes con humedad y contaminantes mínimos.
- Inspecciones de Rutina: Verificar el estado del núcleo y aplicar medidas correctivas oportunas.

- **Conclusión**

Los daños en el núcleo magnético del rotor del motor de inducción pueden tener un impacto severo en su rendimiento, eficiencia y confiabilidad. Estos problemas abarcan desde la deslaminación hasta fisuras, sobrecargas y corrosión, cada uno con consecuencias significativas como el aumento de las pérdidas energéticas, sobrecalentamiento y fallos prematuros.

La prevención efectiva requiere un enfoque integral que combine el uso de materiales de calidad, un diseño adecuado, inspecciones periódicas y un mantenimiento preventivo riguroso. Implementar estas estrategias no solo minimiza los riesgos asociados a fallos en el núcleo magnético, sino que también optimiza la vida útil del motor y reduce los costos operativos.

4.4 MATRIZ DE FALLA EN LOS RODAMIENTOS DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

4.4.1 Modo de fallo: Por vibraciones elevadas del rodamiento

La tabla 17 muestra el Modo de fallo por vibraciones elevadas del rodamiento, cuyas causas son la soltura mecánica, desalineamiento que puede ser paralelo, angular o combinado; los efectos son el ruido excesivo, deterioro del aislamiento, desgaste de los rodamientos, inestabilidad del

sistema mecánico y finalmente parada del motor. Los fallos por vibraciones en los rodamientos de un motor de inducción son un problema común que afecta el rendimiento, la estabilidad y la durabilidad del motor. Las vibraciones pueden originarse por desalineaciones, desbalance en el rotor, defectos en los rodamientos o condiciones operativas adversas.

Tabla 17

Modo de fallo por vibraciones del rodamiento.

COMPONENTE	PROCESO	MODOS DE FALLO	EFEECTO	CAUSA	CONTROLES
RODAMIENTOS	MANTTO DEL RODAMIENTO	VIBRACIONES ELEVADAS - I	RUIDO EXCESIVO Y DETERIORO DE AISLAMIENTO	SOLTURA MECÁNICA	INSPECCIÓN VISUAL Y AUDITIVA, AJUSTE DE LAS TOLERANCIAS
RODAMIENTOS	MANTTO DEL RODAMIENTO	VIBRACIONES ELEVADAS - II	DESGASTE DE RODAMIENTOS Y FALLA	DESALINEAMIENTO: PARALELO, ANGULAR COMBINADO	ALINEAR EL MOTOR Y LA CARGA, CAMBIO DE RODAMIENTO
RODAMIENTOS	MANTTO DEL RODAMIENTO	VIBRACIONES ELEVADAS - III	INESTABILIDAD DEL SISTEMA MECÁNICO	DESBALANCE	ALINEAR EL MOTOR Y LA CARGA, BALANCEO, CAMBIO DE RODAMIENTO

Nota. Desarrollado mediante revisión bibliográfica y entrevista.

Los fallos por vibraciones en los rodamientos de un motor de inducción son un problema común que afecta el rendimiento, la estabilidad y la durabilidad del motor. Las vibraciones pueden originarse por desalineaciones, desbalance en el rotor, defectos en los rodamientos o condiciones operativas adversas.

A continuación, se describen las causas principales, consecuencias, medidas de prevención y conclusiones.

1. Desalineación del rodamiento

- **Descripción:** Una instalación incorrecta o el desgaste del alojamiento del rodamiento pueden causar que este quede desalineado respecto al eje y otras partes del motor.
- **Consecuencias:**
 - Incremento de las vibraciones durante el funcionamiento.
 - Desgaste acelerado de los componentes mecánicos, incluyendo el eje y el rodamiento.
 - Aumento del ruido y reducción de la eficiencia del motor.
- **Prevención:**
 - Alinear correctamente los rodamientos durante la instalación usando herramientas precisas.
 - Inspeccionar regularmente la alineación como parte del mantenimiento preventivo.
 - Garantizar la calidad del montaje y el ajuste en los alojamientos del rodamiento.

2. Desbalance en el rotor

- **Descripción:** Un rotor desbalanceado genera fuerzas centrífugas desiguales que se transmiten al rodamiento, provocando vibraciones.
- **Consecuencias:**
 - Sobrecarga en los rodamientos, lo que acelera su desgaste.
 - Posibilidad de fractura o deformación del rodamiento debido a las tensiones dinámicas.
 - Fallos prematuros en otros componentes del motor debido a vibraciones excesivas en el rotor.
- **Prevención:**
 - Equilibrar dinámicamente el rotor durante la fabricación o después de reparaciones.
 - Monitorear las vibraciones del motor regularmente para detectar problemas tempranos.
 - Evitar operar el motor en condiciones de sobrecarga o desequilibrio.

3. Falta de lubricación adecuada

- **Descripción:** La falta de lubricación o el uso de lubricantes incorrectos aumenta el contacto metal-metal entre los componentes del rodamiento, generando vibraciones.
- **Consecuencias:**
 - Mayor fricción, lo que provoca un incremento de la temperatura y un desgaste acelerado.
 - Aumento del ruido y reducción de la vida útil del rodamiento.
 - Posibilidad de fallos catastróficos del rodamiento que detienen el motor.
- **Prevención:**
 - Usar lubricantes recomendados por el fabricante y aplicar la cantidad adecuada.
 - Implementar un plan de mantenimiento periódico para verificar el estado de la lubricación.
 - Reemplazar el lubricante en intervalos regulares según las condiciones de operación.

4. Defectos en los rodamientos

- **Descripción:** Los defectos en las bolas, jaulas o pistas del rodamiento pueden generar vibraciones durante el funcionamiento.
- **Consecuencias:**
 - Incremento de las vibraciones y ruido anormal en el motor.
 - Deterioro progresivo del rodamiento y daño colateral en los cojinetes o el eje.
 - Fallos prematuros del motor, reduciendo la productividad.

- **Prevención:**

- Seleccionar rodamientos de alta calidad y confiabilidad durante la fabricación o el reemplazo.
- Inspeccionar los rodamientos regularmente para identificar signos de daño.
- Evitar impactos y manejar con cuidado los rodamientos durante su instalación.

5. Cargas axiales o radiales excesivas

- **Descripción:** Las cargas superiores a las especificaciones del rodamiento pueden inducir vibraciones y sobreesfuerzos.
- **Consecuencias:**
 - Daño por fatiga en las pistas y las bolas del rodamiento.
 - Vibraciones que afectan el eje, el estator y otros componentes del motor.
 - Reducción drástica de la vida útil del rodamiento y el motor.
- **Prevención:**
 - Asegurarse de que el motor y los rodamientos estén dimensionados para las condiciones de carga esperadas.
 - Implementar sistemas de monitoreo de carga para evitar sobrecargas.
 - Usar rodamientos diseñados específicamente para manejar cargas elevadas si es necesario.

Conclusión

Las vibraciones en los rodamientos del motor de inducción son un problema crítico que puede causar fallos prematuros, reducir la eficiencia del motor y aumentar los costos operativos. Las causas principales incluyen desalineaciones, desbalance, falta de lubricación, defectos en los rodamientos y cargas excesivas.

La prevención de estos problemas requiere un enfoque integral que incluya un diseño adecuado, una instalación precisa, el monitoreo constante de vibraciones y un mantenimiento regular. Detectar las vibraciones en etapas tempranas y tomar medidas correctivas garantiza un funcionamiento seguro, eficiente y prolonga la vida útil tanto del motor como de sus componentes asociados.

4.4.2 Modo de fallo: Por elemento rodante (cojinetes-rodamientos)

La Tabla 18 muestra el modo de fallo por el elemento rodante que también se denomina cojinete o rodamiento, tiene un conjunto de causas de diversa índole como son la excesiva lubricación, defectuosa lubricación, corriente por el cojinete (efecto fluting), inadecuado montaje,

inadecuada selección, contaminación, sobrecarga, etc. Por otra parte, los efectos entre otros son la disminución de la velocidad y los ruidos anormales.

Los controles que deben aplicarse en este modo de falla son: alineación del motor, control de lubricación, reemplazo de rodamientos, inspección visual, inspección auditiva, ajuste de tolerancias, inspección total del rodamiento, alineación del motor, control de carga, evaluación ambiental, revisión del tiempo de útil de los rodamientos, elaboración de procedimientos de mantenimiento preventivo que considere cada uno las posibles causas y sus efectos.

La prevención de estos fallos exige un enfoque integral y proactivo, que combine un diseño óptimo de los componentes, un programa de mantenimiento periódico, la utilización de lubricantes de alta calidad y el monitoreo constante de las condiciones de operación.

Detectar y abordar los problemas en sus etapas iniciales es clave para maximizar la vida útil del motor, mejorar su desempeño y minimizar los costos asociados a reparaciones inesperadas o interrupciones en el funcionamiento.

Tabla 18

Modo de fallo por elemento rodante (cojinetes – rodamientos)

COMPONENTE	PROCESO	MODOS DE FALLO	EFEECTO	CAUSA	CONTROLES
RODAMIENTOS	MANTTO DEL RODAMIENTO	FALLA DEL ELEMENTO RODANTE (BOLAS O CILINDROS) - I	DISMINUCIÓN DE VELOCIDAD	EXCESIVA LUBRICACIÓN	ALINEACIÓN DEL MOTOR, CONTROL DE LUBRICACIÓN, REEMPLAZO DE RODAMIENTOS
RODAMIENTOS	MANTTO DEL RODAMIENTO	FALLA DEL ELEMENTO RODANTE (BOLAS O CILINDROS) - II	RUIDOS ANORMALES E INCREMENTO DE TEMPERATURA	LUBRICACIÓN DEFECTUOSA	ALINEACIÓN DEL MOTOR, CONTROL DE LUBRICACIÓN, REEMPLAZO DE RODAMIENTOS
RODAMIENTOS	MANTTO DEL RODAMIENTO	FALLA DEL ELEMENTO RODANTE (BOLAS O CILINDROS) - III	RUIDOS ANORMALES E INCREMENTO DE TEMPERATURA	VIBRACIONES EN REPOSO	INSPECCIÓN VISUAL Y AUDITIVA, AJUSTE DE LAS TOLERANCIAS
RODAMIENTOS	MANTTO DEL RODAMIENTO	FALLA DEL ELEMENTO RODANTE (BOLAS O CILINDROS) - IV	RUIDOS ANORMALES E INCREMENTO DE TEMPERATURA	CORRIENTE POR EL COJINETE (FLUTING)	INSPECCIÓN TOTAL DEL RODAMIENTO, REEMPLAZO DE RODAMIENTOS
RODAMIENTOS	MANTTO DEL RODAMIENTO	FALLA DEL ELEMENTO RODANTE (BOLAS O CILINDROS) - V	DISMINUCIÓN DE VELOCIDAD	INADECUADO MONTAJE O SELECCIÓN	ALINEACIÓN DEL MOTOR, CONTROL DE CARGA, REVISIÓN DEL ALINEAMIENTO
RODAMIENTOS	MANTTO DEL RODAMIENTO	FALLA DEL ELEMENTO RODANTE (BOLAS O CILINDROS) - VI	RUIDOS ANORMALES E INCREMENTO DE TEMPERATURA	CONTAMINACIÓN	INSPECCIÓN TOTAL DEL RODAMIENTO, EVALUACIÓN AMBIENTAL
RODAMIENTOS	MANTTO DEL RODAMIENTO	FALLA DEL ELEMENTO RODANTE (BOLAS O CILINDROS) - VII	RUIDOS ANORMALES E INCREMENTO DE TEMPERATURA	SOBRECARGA	INSPECCIÓN TOTAL DEL RODAMIENTO, REVISIÓN DE CARGA

Nota. Desarrollado mediante revisión bibliográfica y entrevista.

Los fallos en los elementos rodantes, como cojinetes y rodamientos, son una de las causas más comunes de problemas mecánicos en los motores de inducción. Estos componentes son esenciales para reducir la fricción y soportar las cargas del eje, por lo que su falla puede comprometer el rendimiento, la eficiencia y la durabilidad del motor. A continuación, se

analizan las principales causas, consecuencias y estrategias de prevención relacionadas con estos fallos.

1. Desgaste por fatiga

- **Descripción:** Ocurre cuando los cojinetes o rodamientos alcanzan su límite de vida útil debido a ciclos repetitivos de carga y descarga.
- **Consecuencias:**
 - Formación de grietas o desprendimientos en las pistas y elementos rodantes.
 - Aumento de las vibraciones y ruidos durante el funcionamiento.
 - Reducción de la eficiencia y posibilidad de fallos catastróficos en el motor.
- **Prevención:**
 - Seleccionar rodamientos de alta calidad diseñados para soportar las condiciones específicas del motor.
 - Realizar inspecciones periódicas y reemplazar los rodamientos al final de su vida útil estimada.
 - Usar lubricantes adecuados para reducir la fricción y el desgaste.

2. Falta de lubricación o lubricación inadecuada

- **Descripción:** La ausencia o el uso de lubricantes incorrectos genera mayor fricción entre los componentes del rodamiento.
- **Consecuencias:**
 - Calentamiento excesivo y desgaste acelerado de los rodamientos.
 - Incremento de las vibraciones y el ruido.
 - Reducción drástica de la vida útil del cojinete o rodamiento, lo que puede causar paradas no planificadas.
- **Prevención:**
 - Utilizar el tipo de lubricante recomendado por el fabricante.
 - Establecer un plan de mantenimiento que incluya la revisión y reposición periódica del lubricante.
 - Monitorear las temperaturas de operación del motor para detectar problemas de lubricación.

3. Contaminación

- **Descripción:** La entrada de partículas como polvo, suciedad o humedad al sistema de rodamientos puede causar abrasión y daños en las superficies de contacto.
- **Consecuencias:**
 - Formación de rayaduras o desgastes irregulares en los elementos rodantes y pistas.

- Incremento de las fricciones internas y generación de vibraciones.
- Posible corrosión en ambientes húmedos, deteriorando los rodamientos.
- **Prevención:**
 - Instalar sellos de alta calidad para proteger los cojinetes y rodamientos contra la contaminación externa.
 - Mantener el área de operación del motor limpia y libre de partículas contaminantes.
 - Inspeccionar regularmente el estado de los rodamientos y los sellos.

4. Sobrecargas mecánicas

- **Descripción:** Cargas axiales o radiales superiores a las especificaciones del rodamiento pueden causar deformaciones o fallos prematuros.
- **Consecuencias:**
 - Fatiga acelerada de las pistas y elementos rodantes.
 - Posibilidad de fracturas o daños estructurales en los cojinetes.
 - Desgaste en otros componentes del motor debido a las vibraciones generadas.
- **Prevención:**
 - Seleccionar rodamientos con capacidad de carga adecuada para las condiciones de operación.
 - Evitar sobrecargas mediante un diseño adecuado y un monitoreo continuo.
 - Implementar dispositivos de protección contra sobrecargas en el sistema.

5. Instalación incorrecta

- **Descripción:** Los errores durante la instalación, como desalineación, golpes o ajustes inadecuados, caídas de carácter fortuito pueden causar tensiones mecánicas en los rodamientos.
- **Consecuencias:**
 - Daño inmediato o reducción de la vida útil de los cojinetes.
 - Generación de vibraciones y ruidos durante el funcionamiento.
 - Mayor riesgo de fallos en los componentes asociados, como el eje.
- **Prevención:**
 - Usar herramientas especializadas para la instalación de rodamientos, evitando golpes y daños.
 - Asegurarse de que los alojamientos y ejes estén dentro de las tolerancias especificadas.
 - Realizar pruebas de alineación después de la instalación.

6. Vibraciones excesivas

- **Descripción:** Las vibraciones generadas por desalineación, desbalance del rotor o defectos en el rodamiento afectan negativamente a los cojinetes.
- **Consecuencias:**
 - Aceleración del desgaste de las pistas y los elementos rodantes.
 - Daño progresivo a otros componentes del motor, como el eje y el estator.
 - Mayor consumo energético debido a las ineficiencias mecánicas.
- **Prevención:**
 - Monitorear regularmente las vibraciones del motor mediante equipos de diagnóstico.
 - Corregir desalineaciones y desbalances para minimizar las tensiones en los rodamientos.
 - Realizar inspecciones periódicas para identificar problemas en etapas tempranas.

Conclusión

Los fallos en los elementos rodantes, como cojinetes y rodamientos, pueden generar una cascada de problemas que afectan el rendimiento, la eficiencia y la confiabilidad del motor de inducción. Las causas más comunes incluyen desgaste por fatiga, falta de lubricación, contaminación, sobrecargas mecánicas, instalación incorrecta y vibraciones excesivas. Prevenir estos fallos requiere un enfoque proactivo que combine un diseño adecuado, un mantenimiento periódico, el uso de lubricantes de calidad y un monitoreo constante de las condiciones operativas. La detección temprana y la corrección de problemas son esenciales para prolongar la vida útil del motor y reducir los costos asociados a reparaciones o paradas no planificadas.

4.4.3 Modo de fallo: Por vibración en rodamientos de fricción

La Tabla 19 muestra el modo de fallo por vibración en rodamientos de fricción, las causas suelen ser falta de lubricación o exceso, holgura de contacto excesiva, rotura de reten, suciedad en zona de lubricación, suciedad en los cojinetes, error de montaje, corrosión, sobrecarga, cavitación. De otro lado los efectos básicamente son los ruidos y el incremento de temperatura.

Cuando se detecta problemas en rodamientos en un motor eléctrico, se podrían recomendar las siguientes acciones:

- Analizar las características del daño: corrosión, erosión, desgaste, cavitación
- Evaluar el procedimiento de montaje y las condiciones actuales.
- Verificar la presencia de desbalance o desalineación.

- Verificar la aplicabilidad del rodamiento.
- Verificar las dimensiones y tolerancias de montaje en cajas y rotor.
- Optimizar el proceso de lubricación.

Adicionalmente suele tomar las siguientes acciones:

- Evaluar los procedimientos y capacidades del personal.
- Practicar la alineación de precisión aplicando los estándares pertinentes.

Tabla 19

Modo de fallo: Por vibración en rodamientos de fricción

COMPONENTE	PROCESO	MODOS DE FALLO	EFEECTO	CAUSA	CONTROLES
RODAMIENTOS	MANTTO DEL RODAMIENTO	VIBRACIÓN EN RODAMIENTOS DE FRICCIÓN I	RUIDOS ANORMALES E INCREMENTO DE TEMPERATURA	FALTA LUBRICACIÓN	INSPECCIÓN TOTAL DEL RODAMIENTO, REVISIÓN DEL LUBRICANTE
RODAMIENTOS	MANTTO DEL RODAMIENTO	VIBRACIÓN EN RODAMIENTOS DE FRICCIÓN II	RUIDOS ANORMALES E INCREMENTO DE TEMPERATURA	HOLGURA DE CONTACTO EXCESIVA	INSPECCIÓN TOTAL DEL RODAMIENTO, AJUSTE DE TOLERANCIAS
RODAMIENTOS	MANTTO DEL RODAMIENTO	VIBRACIÓN EN RODAMIENTOS DE FRICCIÓN III	RUIDOS ANORMALES E INCREMENTO DE TEMPERATURA	ROTURA DE RETEN	INSPECCIÓN TOTAL DEL RODAMIENTO, REEMPLAZO DE RODAMIENTOS
RODAMIENTOS	MANTTO DEL RODAMIENTO	VIBRACIÓN EN RODAMIENTOS DE FRICCIÓN IV	RUIDOS ANORMALES E INCREMENTO DE TEMPERATURA	SUCIEDAD EN ZONA DE LUBRICACIÓN	INSPECCIÓN TOTAL DEL RODAMIENTO, EVALUACIÓN AMBIENTAL
RODAMIENTOS	MANTTO DEL RODAMIENTO	VIBRACIÓN EN RODAMIENTOS DE FRICCIÓN V	RUIDOS ANORMALES E INCREMENTO DE TEMPERATURA	SUCIEDAD EN EL COJINETE	INSPECCIÓN TOTAL DEL RODAMIENTO, EVALUACIÓN AMBIENTAL
RODAMIENTOS	MANTTO DEL RODAMIENTO	VIBRACIÓN EN RODAMIENTOS DE FRICCIÓN VI	RUIDOS ANORMALES E DISMINUCIÓN DE VELOCIDAD	ERROR DE MONTAJE	INSPECCIÓN TOTAL DEL RODAMIENTO, DESARROLLAR UN NUEVO MONTAJE
RODAMIENTOS	MANTTO DEL RODAMIENTO	VIBRACIÓN EN RODAMIENTOS DE FRICCIÓN VII	RUIDOS ANORMALES E INCREMENTO DE TEMPERATURA	CORROSIÓN	INSPECCIÓN TOTAL DEL RODAMIENTO, EVALUACIÓN AMBIENTAL
RODAMIENTOS	MANTTO DEL RODAMIENTO	VIBRACIÓN EN RODAMIENTOS DE FRICCIÓN VIII	RUIDOS ANORMALES E DISMINUCIÓN DE VELOCIDAD	SOBRECARGA	INSPECCIÓN TOTAL DEL RODAMIENTO, REVISIÓN DE CARGA
RODAMIENTOS	MANTTO DEL RODAMIENTO	VIBRACIÓN EN RODAMIENTOS DE FRICCIÓN IX	RUIDOS ANORMALES E INCREMENTO DE TEMPERATURA	CAVITACIÓN	ALINEACIÓN DEL MOTOR, CONTROL DE CARGA, REVISIÓN DEL ALINEAMIENTO

Nota. Desarrollado mediante revisión bibliográfica y entrevista.

Los fallos por vibraciones en los rodamientos de fricción del motor de inducción son una causa común de problemas mecánicos que pueden comprometer el rendimiento, la eficiencia y la durabilidad del motor. Estas vibraciones suelen ser provocadas por desequilibrios, desalineaciones, defectos en los rodamientos o condiciones operativas adversas. A continuación, se analizan las principales causas, consecuencias y estrategias de prevención, así como una conclusión al respecto.

1. Desgaste en la superficie de contacto

- **Descripción:** Las vibraciones generan fricción anormal entre las superficies del rodamiento, lo que provoca desgaste acelerado en las áreas de contacto.
- **Consecuencias:**

- Aumento del juego mecánico, lo que reduce la estabilidad del rotor.
- Pérdida de lubricación efectiva, intensificando el desgaste y el calor generado.
- Posibilidad de fallos catastróficos debido al daño acumulado.
- **Prevención:**
 - Asegurar una lubricación adecuada y de calidad, verificándola periódicamente.
 - Monitorear las vibraciones para identificar problemas en etapas iniciales.
 - Realizar un mantenimiento preventivo regular para reemplazar componentes desgastados.

2. Desalineación del rodamiento

- **Descripción:** Cuando el rodamiento no está correctamente alineado con el eje o las otras partes del motor, las vibraciones aumentan significativamente.
- **Consecuencias:**
 - Tensión desigual en las superficies del rodamiento, acelerando su deterioro.
 - Incremento del ruido operativo y pérdida de eficiencia.
 - Daño colateral en el eje o en otras partes del motor.
- **Prevención:**
 - Utilizar herramientas precisas para alinear el rodamiento durante la instalación.
 - Realizar inspecciones periódicas para garantizar que la alineación se mantenga dentro de las especificaciones.
 - Evitar condiciones de sobrecarga o impactos que puedan desalinear el sistema.

3. Sobrecargas mecánicas

- **Descripción:** Las cargas radiales o axiales superiores a las especificaciones del rodamiento generan vibraciones y esfuerzos adicionales.
- **Consecuencias:**
 - Deformación de las superficies de contacto, afectando la funcionalidad del rodamiento.
 - Fallos prematuros en el rodamiento y en otros componentes asociados, como el eje.
 - Incremento en el consumo energético debido a la mayor resistencia al movimiento.
- **Prevención:**
 - Seleccionar rodamientos diseñados para soportar las condiciones de carga específicas del motor.
 - Implementar sistemas de monitoreo de carga para evitar sobrecargas.

- Diseñar el motor y su sistema de soporte para distribuir las cargas de manera uniforme.

4. Contaminación y partículas extrañas

- **Descripción:** La entrada de partículas contaminantes en el sistema de rodamiento puede generar vibraciones adicionales y abrasión.
- **Consecuencias:**
 - Rayaduras y daños en las superficies de contacto, afectando el funcionamiento del rodamiento.
 - Aceleración del desgaste y pérdida de estabilidad mecánica.
 - Posibilidad de fallo completo del rodamiento en condiciones severas.
- **Prevención:**
 - Usar sellos de alta calidad para proteger el rodamiento de contaminantes externos.
 - Mantener el área de operación del motor limpia y libre de polvo o humedad.
 - Inspeccionar regularmente los rodamientos para detectar y eliminar contaminantes.

5. Vibraciones inducidas por desequilibrios

- **Descripción:** Un rotor desbalanceado transmite vibraciones al rodamiento, incrementando las tensiones mecánicas.
- **Consecuencias:**
 - Daño progresivo en las superficies de contacto y otros componentes internos.
 - Aumento de los niveles de ruido y vibraciones, afectando el entorno operativo.
 - Pérdida de precisión en el funcionamiento del motor y reducción de su vida útil.
- **Prevención:**
 - Equilibrar dinámicamente el rotor durante la fabricación y después de reparaciones.
 - Monitorear regularmente las vibraciones mediante sensores especializados.
 - Corregir desequilibrios en etapas tempranas para evitar daños mayores.

2 Conclusión

Los fallos por vibraciones en los rodamientos de fricción del motor de inducción representan una amenaza significativa para la estabilidad y el desempeño del sistema. Estas vibraciones pueden ser causadas por una variedad de factores, como desgaste, desalineaciones, sobrecargas, contaminación y desequilibrios. Las consecuencias incluyen fallos mecánicos, pérdida de eficiencia, daños colaterales y mayores costos de mantenimiento.

La prevención de estos fallos exige un enfoque proactivo que combine un diseño adecuado, una instalación precisa, un monitoreo constante y un mantenimiento regular.

CAPÍTULO V

LA PLANIFICACIÓN DEL MANTENIMIENTO PREVENTIVO

5.1 GENERALIDADES

El plan del mantenimiento preventivo es una estrategia fundamental para garantizar el rendimiento, la confiabilidad y prolongar la vida útil de los motores trifásicos de inducción. Este plan debe estructurarse sobre tres pilares clave:

El diagnóstico, que básicamente identifica las componentes principales del motor trifásico de inducción y permite determinar los niveles de criticidad de cada componente.

La organización, que implica el análisis de la matriz de fallas que toma en cuenta a las componentes del motor, los procesos, modos de fallo, efecto, causa y los controles que deben de aplicarse.

La programación, que permiten abordar de manera sistemática las necesidades de mantenimiento preventivo del equipo.

5.2 MODELADO GRÁFICO DE LA PLANIFICACIÓN DEL MANTENIMIENTO PREVENTIVO

El mantenimiento preventivo es una estrategia proactiva diseñada para evitar fallos en los equipos mediante la planificación y ejecución de acciones periódicas que aseguren su correcto funcionamiento. Este enfoque se aplica ampliamente en industrias, donde la continuidad operativa y la eficiencia son prioritarias.

5.2.1 Características Principales del Mantenimiento Preventivo

- **Planificación Anticipada:** Las actividades se programan antes de que ocurran fallos, siguiendo calendarios predefinidos o en función de horas de operación.
- **Inspecciones Regulares:** Se realizan revisiones y pruebas para detectar signos de desgaste, deterioro o anomalías.
- **Acciones Preventivas:** Incluyen limpieza, lubricación, calibración, ajuste y reemplazo de piezas antes de que fallen.

5.2.2 Ventajas del Mantenimiento Preventivo

- **Reducción de Paradas no Planificadas:** Minimiza interrupciones inesperadas en la producción.
- **Mayor Vida Útil de los Equipos:** Previene el deterioro acelerado al abordar problemas incipientes.
- **Ahorro Económico:** Reduce los costos asociados a reparaciones correctivas y daños colaterales.

- **Mejora de la Seguridad:** Minimiza el riesgo de accidentes causados por fallos inesperados.

El mantenimiento preventivo es una herramienta indispensable para garantizar la operatividad, seguridad y eficiencia de los equipos industriales. Su implementación adecuada requiere un enfoque estructurado y una cultura organizacional que valore la proactividad y el cuidado de los activos.

El modelo gráfico de la Planificación del mantenimiento preventivo tiene tres componentes generales: el diagnóstico, la organización y la programación; cada una de estas componentes tiene a su vez un factores determinantes de planificación como son: la identificación de componentes y la determinación de los niveles de criticidad; por otro lado un factor fundamental la matriz de fallas de cada componente identificada mediante la criticidad conjuntamente que los procedimientos; y complementariamente las acciones y su frecuencia y finalmente el control o seguimiento de cada acción definida, este modelo gráfico se muestra en la Figura 15

Figura 15

Modelo Gráfico de la Planificación del Mantenimiento Preventivo.



Nota. La gráfica estructura el diagnóstico, la organización y la programación componentes principales de la planificación.

5.3 EL DIAGNÓSTICO

El primer paso para implementar un plan de mantenimiento preventivo efectivo es el diagnóstico. Esto implica identificar los componentes principales del motor de inducción y luego determinar los niveles de criticidad.

En el capítulo III del presente trabajo se describe ampliamente el procedimiento para determinar los niveles de criticidad y se elaboró la tabla 5 de la Matriz de criticidad de las componentes principales del motor de inducción trifásico.

Por otra parte el diagnóstico tiene como objetivo principal evaluar el estado actual del motor trifásico de inducción y anticipar posibles problemas que puedan afectar su operación eficiente. Adicionalmente un diagnóstico también se basa en:

5.3.1 Identificación de Componentes Críticos:

- **Rotor:** Se evalúan por su importancia en la generación del campo magnético necesario para el funcionamiento del motor.
- **y Estator:** Se evalúan por su importancia en la generación del campo magnético necesario para el funcionamiento del motor.
- **Bobinas y Aislamiento:** Se analiza el estado de las bobinas y su capacidad para resistir las altas tensiones sin sufrir deterioro.
- **Rodamientos:** Componentes esenciales para el movimiento rotativo, susceptibles al desgaste por fricción y falta de lubricación.
- **Carcasa y Ventilación:** La estructura externa y el sistema de enfriamiento son claves para evitar el sobrecalentamiento.
- **Sistema de Alimentación Eléctrica:** Incluye terminales, conectores y cables, los cuales deben estar en buen estado para evitar interrupciones.

5.3.2 Cuadro de Criticidad

A continuación, se presenta la Tabla 20 de criticidad que muestra la importancia y el impacto de las fallas de los componentes del motor de inducción trifásico. Dicha tabla permite identificar los elementos más vulnerables del sistema, considerando la frecuencia de ocurrencia y las consecuencias asociadas a cada modo de falla. Asimismo, constituye una herramienta fundamental para priorizar las acciones de mantenimiento preventivo y correctivo. El análisis de criticidad facilita la toma de decisiones técnicas orientadas a optimizar recursos, reducir riesgos operativos y mejorar la confiabilidad global del motor, además presenta la justificación correspondiente.

Tabla 20*Cuadro de criticidad basada en la posibilidad de reparación*

Componente	Criticidad	Justificación
Cubierta frontal o tapa	No crítica (NC)	Posibilidad mínima de falla; no afecta directamente la producción y es fácilmente reparable.
Caja de conexiones	No crítica (NC)	Baja probabilidad de falla y fácil reparación en caso de problemas menores.
Carcasa	No crítica (NC)	Su función principal es estructural, con impacto limitado en la operación del motor.
Base de fijación	No crítica (NC)	Daño poco frecuente; reparaciones inmediatas y de bajo impacto en la producción.
Tapa posterior	No crítica (NC)	No afecta directamente la funcionalidad operativa del motor.
Placa de características	No crítica (NC)	No influye en la operación del motor; daño no crítico para la producción.
Flecha o eje	Media crítica (MC)	Soporta el torque del motor; falla relativa que puede provocar desalineaciones y afectar la producción.
Núcleo del estator	Media crítica (MC)	Importante para la generación del campo magnético; falla con impacto moderado en la operación.
Núcleo del rotor	Media crítica (MC)	Incidencia en la transmisión de potencia; requiere atención inmediata en caso de falla.
Aislantes	Crítica (C)	Alta posibilidad de falla; esenciales para el aislamiento eléctrico y evitar cortocircuitos.
Bobinas del estator	Crítica (C)	Fallas pueden generar paradas completas del motor y son costosas de reparar.
Jaula de ardilla del rotor	Crítica (C)	Fundamental para la operación; alta criticidad por su función en la transferencia de potencia.
Rodamientos	Crítica (C)	Componentes esenciales; fallas generan vibraciones y daños a otros componentes críticos.

Nota. Se desarrolló en función a revisión documental y entrevista de expertos.

5.3.3 Técnicas de Diagnóstico:

- **Inspección Visual:** Permite detectar problemas visibles como acumulación de polvo, corrosión, conexiones sueltas o fugas de lubricante.
- **Mediciones Eléctricas:** Incluyen la evaluación de resistencia de aislamiento, desequilibrios de corriente y voltaje, y pruebas de continuidad para detectar fallas en el bobinado.
- **Análisis de Vibraciones:** Identifica desalineaciones, desequilibrios del rotor y rodamientos defectuosos mediante el monitoreo de frecuencias específicas y amplitudes.
- **Termografía:** Detecta puntos calientes que indiquen posibles fallos en componentes eléctricos o mecánicos, como conexiones flojas o aislamiento defectuoso.

- **Pruebas Funcionales:** Evalúan el rendimiento bajo condiciones de carga para determinar la eficiencia, el factor de potencia y la respuesta del motor a variaciones de carga.
- **Análisis de Aceite o Lubricante:** Permite identificar partículas metálicas, contaminantes o deterioro del lubricante, lo que indica desgaste en los rodamientos o sellos.

5.3.4 Documentación de Resultados:

- Registrar detalladamente las condiciones iniciales, los hallazgos y las recomendaciones en reportes técnicos. Esto sirve como referencia para comparar el estado futuro del motor y evaluar la efectividad de las acciones correctivas y preventivas.

El diagnóstico no solo permite priorizar los recursos hacia los componentes más críticos, sino también establecer una base sólida para diseñar actividades preventivas efectivas y evitar fallas inesperadas que podrían generar costos elevados y tiempos de inactividad prolongados. Un diagnóstico con una base de datos precisa y bien documentada es la piedra angular para garantizar la operación confiable y eficiente de los motores trifásicos de inducción.

5.4 ORGANIZACIÓN

La organización del mantenimiento se basa en la elaboración de la matriz de fallas, los procedimientos claros y la asignación de recursos adecuados. La etapa de la organización está basada en la matriz de fallas tomando en cuenta: Cada uno de los componentes del motor de inducción, el modo de fallo, el efecto, la causa y los controles en una forma secuencial.

5.4.1 Los procedimientos operativos

A.- Inspección visual y limpieza:

- Verificar el estado externo del motor.
- Limpiar el polvo y las partículas acumuladas.

B.- Revisión de conexiones eléctricas:

- Comprobar el ajuste de terminales.
- Inspeccionar la integridad de los cables y conexiones.

C.- Verificación de rodamientos:

- Detectar ruido o vibraciones inusuales.
- Medir temperatura y aplicar lubricación según las especificaciones del fabricante.

D.- Análisis de vibraciones y temperatura:

- Identificar desequilibrios o desalineaciones.
- Monitorear picos de temperatura.

E.- Pruebas eléctricas:

- Realizar pruebas de resistencia de aislamiento y continuidad.

5.4.2 Análisis de la Matriz de Fallas:

En el capítulo IV se desarrolló con amplitud la descripción y análisis de las matrices de fallas, los cuadros 1 al cuadro 15, en las que se muestran:

Las matrices de falla del estator

Las matrices de falla del rotor

Las matrices de falla de los rodamientos

Cada una de las 15 matrices tiene la siguiente estructura:

- **Componentes críticos identificados:** clasificado en tres grupos: el estator, el rotor y los rodamientos.
- **Modos de Fallo:** Identificación de posibles fallas mecánicas y eléctricas, como desalineaciones, desequilibrios, cortocircuitos, problemas de sobrecalentamiento, etc.
- **Causas Probables:** Incluyen contaminación, falta de mantenimiento, cargas excesivas y condiciones ambientales adversas y otros.
- **Consecuencias:** Desde una reducción en la eficiencia operativa hasta daños irreversibles que paralicen el motor.
- **Frecuencia y Severidad:** Evaluar la probabilidad de ocurrencia de cada fallo y su impacto en la operación general.
- **Estrategias Preventivas:** Proponer acciones específicas para mitigar riesgos según el análisis realizado.

5.4.3 Gestión de recursos

- **Personal:**
 - Formación específica en mantenimiento de motores.
 - Asignación de responsabilidades claras.
- **Herramientas y equipos:**
 - Multímetro, termómetro infrarrojo, analizador de vibraciones y otros equipos adicionales.
 - Herramientas para desmontaje y lubricación.
- **Repuestos:**
 - Bobinas de repuesto, rodamientos, aceites, aislantes, grasas y materiales específicos.

5.5 LA PROGRAMACIÓN DEL MANTENIMIENTO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

La programación del mantenimiento del motor de inducción se estructura en función de las tareas específicas a realizar en cada componente crítico, asignando frecuencias de

mantenimiento adecuadas según la importancia, además una estimación de costos asociados para cada componente.

5.5.1 El estator del motor de inducción

- **Tareas:**
 - Limpieza de los devanados para evitar acumulación de polvo.
 - Pruebas de aislamiento eléctrico.
 - Inspección visual de conexiones y sobrecalentamiento.
- **Frecuencia:**
 - Limpieza: Semestral.
 - Pruebas de aislamiento: Anual.
 - Inspección visual: Mensual.
- **Control y Seguimiento:**
 - Uso de registros de resistencia de aislamiento para identificar tendencias de deterioro.
 - Checklists de inspección.
- **Costos:**
 - Limpieza: \$50 - \$100.
 - Pruebas: \$100 - \$150.

5.5.2 El rotor del motor de inducción

- **Rotor**
- **Tareas:**
 - Inspección visual de daños en el núcleo magnético.
 - Verificación de balance dinámico.
 - Ajuste y alineación.
- **Frecuencia:**
 - Inspección visual: Trimestral.
 - Verificación de balance: Anual.
- **Control y Seguimiento:**
 - Reportes de balanceo dinámico y seguimiento a las desviaciones detectadas.
- **Costos:**
 - Inspección: \$75 - \$150.

- Balanceo dinámico: \$200 - \$400.

5.5.3 Los rodamientos del motor de inducción

Rodamientos

- **Tareas:**
 - Lubricación con grasa adecuada.
 - Verificación de desgaste y vibraciones.
 - Sustitución si es necesario.
- **Frecuencia:**
 - Lubricación: Cada 3 meses.
 - Inspección: Semestral.
 - Sustitución: Cada 3 años.
- **Control y Seguimiento:**
 - Monitoreo de vibraciones con sensores.
 - Uso de registros de lubricación.
- **Costos:**
 - Lubricación: \$20 - \$50 por sesión.
 - Sustitución: \$200 - \$500.

5.5.4 La tapa o cubierta frontal del motor de inducción

- **Tapa o Cubierta Frontal**
- **Tareas:**
 - Inspección de sujeción y deformaciones.
 - Limpieza periódica.
- **Frecuencia:**
 - Inspección: Semestral.
- **Control y Seguimiento:**
 - Reportes visuales de inspección con fotos.
- **Costos:**
 - Limpieza e inspección: \$30 - \$70.

5.5.5 El eje del motor de inducción

- **Eje o Flecha**
- **Tareas:**
 - Inspección por desgaste, deformaciones o corrosión.
 - Verificación de alineación.
- **Frecuencia:**
 - Inspección: Trimestral.
- **Control y Seguimiento:**
 - Reportes de inspección con parámetros de alineación registrados.
- **Costos:**
 - Inspección: \$50 - \$100.

5.5.6 La carcasa del motor de inducción

- **Carcasa**
- **Tareas:**
 - Limpieza externa para disipación de calor.
 - Inspección de integridad estructural.
- **Frecuencia:**
 - Limpieza: Mensual.
 - Inspección: Anual.
- **Control y Seguimiento:**
 - Reportes fotográficos post limpieza.
- **Costos:**
 - Limpieza: \$20 - \$50.

5.5.7 La Placa de características del motor de inducción

- **Placa de Características**
- **Tareas:**
 - Verificar legibilidad y sujeción.
 - Confirmar especificaciones técnicas.
- **Frecuencia:**
 - Inspección: Anual.

- **Control y Seguimiento:**
 - Checklists de verificación.
- **Costos:**
 - Inspección: \$10 - \$20.

5.5.8 La base mecánica del motor de inducción

- **Base Mecánica o de Fijación**
- **Tareas:**
 - Verificación de estabilidad y nivelación.
 - Inspección de tornillos y elementos de fijación.
- **Frecuencia:**
 - Inspección: Trimestral.
- **Control y Seguimiento:**
 - Reportes de torque de fijación y nivelación.
- **Costos:**
 - Inspección: \$30 - \$60.

5.5.9 El ventilador del motor de inducción

- **Ventilador**
- **Tareas:**
 - Limpieza de las aspas para evitar obstrucciones.
 - Verificación de fijación.
- **Frecuencia:**
 - Limpieza: Mensual.
 - Inspección: Trimestral.
- **Control y Seguimiento:**
 - Comparación de fotos antes y después de limpieza.
- **Costos:**
 - Limpieza: \$20 - \$40.

5.5.10 La tapa o cubierta posterior del motor de inducción

- **Tapa o Cubierta Posterior**
- **Tareas:**

- Limpieza e inspección de grietas o deformaciones.
 - Verificación de sujeción.
- **Frecuencia:**
 - Inspección: Semestral.
- **Control y Seguimiento:**
 - Reportes de inspección y limpieza.
- **Costos:**
 - Limpieza e inspección: \$30 - \$70.

5.5.11 Los devanados del estator del motor de inducción

- **Devanados del Estator**
- **Tareas:**
 - Pruebas de resistencia eléctrica.
 - Limpieza para evitar acumulación de polvo.
- **Frecuencia:**
 - Limpieza: Semestral.
 - Pruebas: Anual.
- **Control y Seguimiento:**
 - Registros de pruebas con mediciones de resistencia eléctrica.
- **Costos:**
 - Limpieza: \$50 - \$100.
 - Pruebas: \$100 - \$200.

5.5.12 La jaula de ardilla del rotor del motor de inducción

- **Jaula de Ardilla del Rotor**
- **Tareas:**
 - Inspección visual de grietas o roturas.
 - Verificación de balance.
- **Frecuencia:**
 - Inspección: Anual.
- **Control y Seguimiento:**
 - Reportes con datos de inspección y balanceo.

- **Costos:**
 - Inspección: \$150 - \$300.

5.5.13 Los empaques del motor de inducción

- **Empaques**
- **Tareas:**
 - Verificación de sellos.
 - Sustitución si están deteriorados.
- **Frecuencia:**
 - Inspección: Semestral.
 - Sustitución: Según condición (1-2 años).
- **Control y Seguimiento:**
 - Registros de inspección con fotos.
- **Costos:**
 - Inspección: \$20 - \$40.
 - Sustitución: \$50 - \$100.

5.5.14 Las borneras del motor de inducción

- **Borneras**
- **Tareas:**
 - Limpieza de terminales.
 - Verificación de conexiones eléctricas.
- **Frecuencia:**
 - Inspección: Trimestral.
- **Control y Seguimiento:**
 - Checklists de conexión y limpieza.
- **Costos:**
 - Limpieza e inspección: \$20 - \$50.

5.5.15 Los accesorios del motor de inducción

- **Otros Accesorios**
- **Tareas:**
 - Revisión de sensores y sistemas auxiliares.

- Verificación de alarmas y sistemas de protección.
- Sujeción mecánica de componentes
- **Frecuencia:**
 - Inspección: Semestral.
- **Control y Seguimiento:**
 - Reportes de funcionamiento de alarmas y sensores.
- **Costos:**
 - Inspección: \$50 - \$150.

Conclusión

El modelo gráfico de la planificación del mantenimiento preventivo asegura que cada componente del motor de inducción reciba la atención adecuada, minimizando fallas y maximizando la eficiencia operativa. La integración de controles y seguimiento permite tomar decisiones fundamentadas y optimizar recursos.

CAPÍTULO VI

LOS RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 GENERALIDADES

Para exponer los resultados obtenidos en el presente proyecto tomamos como referencia inicial el objetivo general propuesto: “Desarrollar el plan de mantenimiento preventivo para la operación eficiente del motor trifásico de inducción mediante la sistematización de la matriz de fallas y la criticidad” en ese sentido se desarrolló el plan de mantenimiento preventivo para operación eficiente del motor de inducción trifásicos que requiere una comprensión profunda de los riesgos asociados a sus diferentes componentes y de los impactos que sus fallas pueden tener en la operación. En esa dirección, el análisis de criticidad y la implementación de una matriz de fallas se convierten en herramientas fundamentales para priorizar actividades, garantizar la eficiencia y la confiabilidad del equipo.

6.2 LA CRITICIDAD COMO RESULTADO DEL OBJETIVO

El análisis de criticidad permitió determinar las partes del motor en función de su importancia operativa, identificando aquellas componentes cuya falla podría generar paradas significativas o daños secundarios. Componentes como los rodamientos, las bobinas del estator y la jaula de ardilla del rotor se clasifican como críticos debido a su alta probabilidad de fallo y su impacto directo en la producción, mientras que otros, como la carcasa o la placa de características, presentan una criticidad baja y pueden ser reparados de forma inmediata sin afectar la operación y producción.

La identificación de los niveles de criticidad de las partes del motor de inducción trifásico permite enfocar los esfuerzos del mantenimiento preventivo en los componentes que tienen mayor probabilidad de falla y generan un impacto crítico en la producción. Este enfoque asegura que los recursos técnicos y económicos sean asignados de manera eficiente, maximizando la disponibilidad del equipo.

6.2.1 Diferenciación de Estrategias de Mantenimiento

Para componentes no críticos (NC), se recomienda un mantenimiento básico, como inspecciones visuales y limpieza periódica, ya que su incidencia en la operación es mínima y sus reparaciones pueden realizarse rápidamente.

Los componentes de criticidad media (MC), como el eje y los núcleos del estator y rotor, requieren inspecciones más detalladas y acciones correctivas inmediatas en caso de falla, dado que su deterioro puede generar problemas secundarios y afectar la producción.

En los componentes críticos (C), como los aislantes, bobinas, jaula de ardilla y rodamientos, el mantenimiento preventivo debe ser exhaustivo, utilizando tecnologías avanzadas para monitorear su estado y prever fallos que podrían detener completamente la operación.

Los componentes de criticidad media, como el eje, aunque no son los más vulnerables, desempeñan un papel clave en la prevención de fallos en otros sistemas. Por ejemplo, un eje desalineado puede generar vibraciones excesivas que dañen los rodamientos y alteren el entrehierro, incrementando los costos de mantenimiento y reparación.

6.2.2 Optimización de Frecuencias de mantenimiento y Recursos

La criticidad de cada componente determina la frecuencia de las actividades de mantenimiento:

- Componentes críticos: Monitoreo continuo, inspecciones trimestrales o semestrales y reparaciones inmediatas cuando sea necesario.
- Componentes de criticidad media: Inspecciones trimestrales o semestrales y mantenimiento correctivo preventivo.
- Componentes no críticos: Inspecciones anuales y mantenimiento correctivo según sea necesario.

Este enfoque reduce los costos al evitar intervenciones innecesarias y prolonga la vida útil de los componentes.

6.2.3 Requerimientos Tecnológicos y Especialización

El mantenimiento de los componentes críticos, debido a su alta vulnerabilidad y su impacto en la operación, requiere el uso de tecnología avanzada, como análisis termográficos, monitoreo de vibraciones y pruebas de resistencia eléctrica, además de personal capacitado para interpretar los datos y realizar las intervenciones necesarias.

6.2.4 Reducción del Riesgo Operativo

Incorporar la criticidad en la planificación del mantenimiento preventivo minimiza riesgos de paradas no planificadas, optimiza los costos operativos y asegura la continuidad de la producción, fortaleciendo la confiabilidad del motor de inducción.

En resumen, considerar la criticidad de los componentes como un eje central del mantenimiento preventivo no solo optimiza el uso de recursos, sino que también garantiza la operatividad del motor de inducción y la sostenibilidad de los procesos productivos. Este enfoque permite anticiparse a los fallos y mitigar su impacto en la operación industrial.

6.3 LA MATRIZ DE FALLAS COMO RESULTADO DEL OBJETIVO

La matriz de fallas es una herramienta analítica clave en la planificación y gestión del mantenimiento preventivo, ya que permite estructurar la información sobre los posibles modos de fallo de los componentes del motor de inducción. Su importancia radica en su capacidad para identificar y priorizar acciones específicas que minimicen riesgos, optimicen recursos y mantengan la confiabilidad operativa del equipo.

Se desarrollaron la matriz de falla para cada componente del motor de inducción, la misma incluye:

- **Componentes críticos identificados:** clasificado en tres grupos: el estator, el rotor y los rodamientos.
- **Modos de Fallo:** Identificación de posibles fallas mecánicas y eléctricas, como desalineaciones, desequilibrios, cortocircuitos, problemas de sobrecalentamiento, etc.
- **Causas Probables:** Incluyen contaminación, falta de mantenimiento, cargas excesivas y condiciones ambientales adversas y otros.
- **Consecuencias:** Desde una reducción en la eficiencia operativa hasta daños irreversibles que paralicen el motor.
- **Frecuencia y Severidad:** Evaluar la probabilidad de ocurrencia de cada fallo y su impacto en la operación general.
- **Controles Preventivos:** Proponer acciones específicas para mitigar riesgos según el análisis realizado.

Los resultados obtenidos fueron para cada componente con los diferentes modos de fallo siguientes:

MATRIZ DE FALLA DEL ESTATOR DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

Modo de fallo: el motor no arranca.

Modo de fallo: Por aislamiento eléctrico.

Modo de fallo: Por sobretensión y la presencia de armónicos

Modo de fallo: Por fallo de aislamiento debido a la contaminación ambiental

Modo de fallo: Por sobrecarga

Modo de fallo: En el circuito magnético del estator

MATRIZ DE FALLA EN EL ROTOR DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

Modo de fallo: En barra o jaula de ardilla del rotor

Modo de fallo: Daño en acero activo o material magnético del rotor

Modo de fallo: Fractura o flexión del eje

Modo de fallo: Pérdidas de ajuste en la zona del rodamiento

Modo de fallo: Por desbalance

Modo de fallo: Por daños en el núcleo magnético del rotor.

MATRIZ DE FALLA EN LOS RODAMIENTOS DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

Modo de fallo: Por vibraciones elevadas del rodamiento

Modo de fallo: Por elemento rodante (cojinetes-rodamientos)

Modo de fallo: Por vibración en rodamientos de fricción

La matriz de fallas proporciona una estructura detallada para identificar modos de fallo, causas probables y consecuencias asociadas. Este enfoque permite definir estrategias específicas para cada componente, desde tareas básicas de inspección y limpieza para partes no críticas, hasta monitoreo continuo y mantenimiento especializado en elementos de alta criticidad.

Los resultados obtenidos de estas herramientas destacan la importancia de adaptar el mantenimiento a las necesidades específicas de cada componente, considerando tanto su criticidad como los riesgos operativos asociados. Este enfoque garantiza un equilibrio entre la inversión en mantenimiento y la confiabilidad del motor, minimizando el riesgo de fallos inesperados y maximizando la eficiencia del sistema.

6.4 Discusión de resultados

6.4.1 Discusión de resultados del objetivo general

En el presente trabajo de investigación se desarrolló el plan de mantenimiento preventivo para la operación del motor trifásico de inducción mediante la sistematización de la matriz de fallas y de criticidad y se elaboró la matriz de criticidad de las componentes principales del motor de inducción trifásico (tabla 5) como parte importante del plan de mantenimiento, del mismo modo se determinó la matriz de fallas de cada componente (cuadro 1 al 15) tomando en cuenta el proceso, el modo de fallo, el efecto, la causa y los controles operativos del motor de inducción. En ese sentido se establece que la matriz de criticidad es inherente y factor fundamental en la etapa del diagnóstico del plan de mantenimiento preventivo, del mismo modo en la etapa de organización del plan de mantenimiento la matriz de fallas se constituye en la base de decisiones y orienta el proceso de mantenimiento preventivo del motor de inducción. Por consiguiente, se acepta la hipótesis general donde se indica que la matriz de fallas garantiza la planificación del mantenimiento preventivo al establecer un marco sistemático de criticidad de las componentes estructurales para la operación eficiente del motor trifásico de inducción. Esta necesidad del Plan de mantenimiento preventivo y su importancia es planteada por Hernández (2009), señala que es necesario el seguimiento a los planes de mantenimiento implementados para desarrollar

permanentes cambios tomando en cuenta que los activos fijos y maquinarias también están en permanentes cambios.

6.4.2 Discusión de resultados del objetivo específico

El análisis de los procesos de planificación del mantenimiento preventivo para la operación eficiente del motor trifásico de inducción confirmó la importancia de las etapas de diagnóstico, organización y programación. Este hallazgo se alinea con la hipótesis planteada, que sugiere que dichos procesos son esenciales para garantizar el desempeño óptimo del motor de inducción trifásico y minimizar interrupciones no planificadas. El diagnóstico constituye la etapa inicial y fundamental en la planificación del mantenimiento preventivo. Este proceso permite identificar los modos de fallo potenciales y evaluar la criticidad de los componentes, una tarea imprescindible para priorizar las actividades de mantenimiento. En el contexto de esta investigación, se observó que el diagnóstico no solo mejora la comprensión de los riesgos asociados a los componentes críticos, como los rodamientos y las bobinas del estator, sino que también proporciona información valiosa para tomar decisiones oportunas sobre intervenciones preventivas. La organización de las tareas de mantenimiento, basada en herramientas como la matriz de fallas, facilita la asignación adecuada de recursos y permite abordar los modos de fallo de manera estructurada. Este enfoque asegura que los componentes críticos reciban la atención necesaria, reduciendo así los riesgos de fallos inesperados. Los resultados respaldan la importancia de la organización como una etapa que integra conocimientos técnicos y estratégicos, optimizando la utilización de recursos humanos y materiales en el mantenimiento preventivo. La programación, como etapa final de la planificación, garantiza que las actividades de mantenimiento se lleven a cabo en los intervalos adecuados y con un control estricto de calidad. Los hallazgos corroboran el planteamiento de Ponce Villavicencio (2013), quien destacó que una programación eficiente es esencial para mantener el desempeño del motor trifásico de inducción. Este estudio subraya que la implementación de controles específicos, como el monitoreo de vibraciones y las pruebas eléctricas periódicas, mejora significativamente la confiabilidad operativa del motor. Los resultados obtenidos con la hipótesis muestran una fuerte relación entre los procesos de diagnóstico, organización y programación, y la operación eficiente del motor trifásico de inducción. Cada uno de estos procesos aborda aspectos clave de la gestión del mantenimiento: el diagnóstico proporciona una comprensión clara del estado del equipo, la organización estructura el trabajo de manera efectiva y la programación asegura la ejecución oportuna de las tareas. Esta relación confirma la hipótesis inicial de que los principales procesos de planificación son determinantes para la eficiencia operativa. Desde un punto de

vista práctico, estos hallazgos destacan la necesidad de incorporar tecnologías avanzadas, como sistemas de monitoreo en tiempo real, para mejorar el diagnóstico y el control durante la programación. Teóricamente, este estudio contribuye a consolidar el marco conceptual del mantenimiento preventivo en motores de inducción, proporcionando evidencia empírica sobre la importancia de los procesos analizados. La investigación reafirma que el diagnóstico, la organización y la programación son pilares fundamentales en la planificación del mantenimiento preventivo, directamente vinculados con la operación eficiente del motor trifásico de inducción. Estos resultados tienen implicaciones significativas para la industria, ya que ofrecen una guía estructurada para mejorar la confiabilidad y el rendimiento de los motores eléctricos, minimizando tiempos de inactividad y costos operativos.

CONCLUSIONES

Conclusión 1

Se desarrolló el Plan de Mantenimiento Preventivo que constituye una estrategia técnica y organizativa esencial para garantizar el rendimiento, la confiabilidad y la longevidad de los motores trifásicos de inducción. La incorporación de herramientas analíticas como el análisis de criticidad y la matriz de fallas en su desarrollo permite abordar de manera integral los desafíos asociados con el mantenimiento de estos equipos en entornos industriales exigentes.

El análisis de criticidad (tabla 13) desempeña un papel fundamental al identificar y clasificar los componentes del motor según su importancia relativa en el sistema. Este enfoque prioriza las acciones de mantenimiento en aquellas partes consideradas críticas, como los rodamientos, los devanados del estator y la jaula de ardilla del rotor, cuya falla tiene una alta probabilidad de ocurrencia y consecuencias significativas para la operación. Al mismo tiempo, las partes menos críticas, como la carcasa, la base de fijación o las tapas, se manejan con medidas correctivas inmediatas y de menor complejidad, optimizando el uso de recursos.

Por otro lado, la matriz de fallas (Tablas del 5 al 20) permiten estructurar de forma detallada los modos de fallo, sus causas, efectos y controles necesarios. Este instrumento proporciona una visión integral y proactiva del comportamiento del motor, lo que facilita la detección temprana de problemas y la implementación de estrategias preventivas específicas. Además, al vincular los modos de fallo con sus causas y consecuencias, se logra un enfoque sistemático para minimizar riesgos operativos y optimizar el desempeño del equipo.

La integración de la criticidad y la matriz de fallas en el Plan de Mantenimiento Preventivo no solo fortalece la capacidad de respuesta ante posibles fallas, sino que también mejora la planificación y ejecución de las actividades de mantenimiento. Este enfoque integral promueve la reducción de costos asociados con reparaciones no planificadas, incrementa la disponibilidad operativa y prolonga la vida útil del motor.

En resumen: un Plan de Mantenimiento Preventivo que considere la criticidad y la matriz de fallas no solo aborda las necesidades técnicas del equipo, sino que también impulsa una gestión eficiente de recursos, garantizando una operación confiable y eficiente del motor trifásico de inducción en el largo plazo. Este enfoque refuerza la sostenibilidad operativa en entornos industriales y destaca la importancia de un mantenimiento fundamentado en análisis sistemáticos y datos concretos.

Conclusión 2

Se analizó los principales procesos de la planificación del mantenimiento preventivo que constituye una herramienta estratégica esencial para garantizar el rendimiento óptimo y la extensión de la vida útil de los motores trifásicos de inducción. La estructura de este plan se fundamenta en tres pilares clave que, de forma integrada, los que permiten abordar de manera efectiva las necesidades del equipo y minimizar el riesgo de fallos inesperados.

En primer lugar, el diagnóstico es crucial para identificar y clasificar las principales componentes del motor en función de su nivel de criticidad. Este enfoque permite priorizar las intervenciones en aquellos elementos cuyo fallo podría tener un impacto severo en la operación, como los aislantes, las bobinas del estator, la jaula de ardilla y los rodamientos, mientras se mantienen prácticas más sencillas para componentes de menor criticidad.

En segundo lugar, la organización del mantenimiento que se basa en la matriz de fallas, una herramienta que analiza de manera sistemática los modos de fallo, sus efectos, causas y los controles aplicables. Este enfoque estructurado asegura que cada aspecto relevante del mantenimiento sea considerado, permitiendo una asignación eficiente de los recursos disponibles y contribuyendo a una gestión más efectiva del riesgo operativo.

Por último, la programación juega un rol determinante al establecer un marco temporal para las actividades de mantenimiento, incluyendo la frecuencia y los controles necesarios. Este pilar permite que las tareas preventivas se lleven a cabo de manera ordenada y proactiva, evitando tiempos de inactividad no planificados y maximizando la disponibilidad del equipo.

Conclusión 3

El análisis de las etapas estructurales de la matriz de fallas, específicamente el modo de fallo, el efecto, la causa y los controles operativos, demuestra ser una herramienta fundamental para garantizar una planificación efectiva del mantenimiento preventivo y, consecuentemente, la operación eficiente del motor trifásico de inducción.

El modo de fallo constituye el primer paso en la identificación de problemas potenciales en los componentes del motor. Reconocer cómo pueden fallar las partes clave, como los rodamientos, los devanados del estator o la jaula de ardilla del rotor, permite focalizar las estrategias de mantenimiento en los puntos más vulnerables del sistema.

El efecto del fallo, que evalúa las consecuencias operativas y económicas, ayuda a priorizar los modos de fallo en función de su impacto en la producción, la seguridad y la eficiencia del motor. Esto facilita una asignación eficiente de recursos y evita interrupciones significativas en el proceso productivo.

La causa del fallo, como sobrecargas, contaminación, desalineación o falta de lubricación, proporciona la base para desarrollar acciones preventivas específicas. Abordar estas causas desde el diseño del mantenimiento asegura que los problemas se mitiguen antes de que ocurran, reduciendo el riesgo de daños mayores.

Finalmente, los controles operativos garantizan que las medidas de prevención se implementen y supervisen de manera continua. Esto incluye actividades como inspecciones periódicas, monitoreo de parámetros críticos y la implementación de estándares de calidad en las tareas de mantenimiento.

En resumen: La matriz de fallas, con sus etapas estructurales claramente definidas, permite un enfoque sistemático y proactivo para planificar el mantenimiento preventivo del motor trifásico de inducción. Este enfoque no solo asegura la operación eficiente del equipo, sino que también minimiza los costos operativos y extiende la vida útil del motor en entornos industriales exigentes.

RECOMENDACIONES

1. Implementación y actualización del Plan de Mantenimiento Preventivo.
Se recomienda implementar de manera formal el Plan de Mantenimiento Preventivo propuesto, integrándolo a los procedimientos operativos de la organización y asegurando su aplicación sistemática. Asimismo, dicho plan debe actualizarse periódicamente considerando cambios en las condiciones de operación, cargas mecánicas, entorno industrial y comportamiento histórico del motor, garantizando su vigencia y efectividad.
2. Priorización del mantenimiento basado en análisis de criticidad
Es fundamental utilizar el análisis de criticidad como herramienta permanente para la toma de decisiones en mantenimiento, priorizando la atención de los componentes críticos identificados, tales como rodamientos, devanados del estator y la jaula de ardilla del rotor. Este enfoque permite optimizar recursos técnicos y económicos, reduciendo el riesgo de fallas con alto impacto operativo.
3. Uso sistemático de la matriz de fallas y técnicas de diagnóstico
Se recomienda emplear la matriz de fallas como un instrumento dinámico y de mejora continua, alimentado con información proveniente del historial de fallas, inspecciones y monitoreo de condición. Asimismo, se sugiere complementar su aplicación con técnicas predictivas como análisis de vibraciones, medición de temperatura, análisis de corriente y pruebas de aislamiento, fortaleciendo la detección temprana de fallas.
4. Fortalecimiento de la gestión del mantenimiento y del capital humano
Se aconseja capacitar continuamente al personal de mantenimiento en el uso de herramientas de análisis de criticidad y matriz de fallas, así como integrar el plan con sistemas de gestión de activos y el seguimiento de indicadores de desempeño (MTBF, MTTR, disponibilidad). Estas acciones permitirán evaluar la efectividad del mantenimiento, mejorar la planificación y asegurar la confiabilidad y sostenibilidad operativa del motor trifásico de inducción en el largo plazo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. A. Mamani, *Análisis de rentabilidad de la actividad eléctrica: Caso reparación y mantenimiento de motores eléctricos en la Ciudad del Cusco*, Cusco: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, 2017.
- [2] CooperAccion, «CooperAccion,» 2023. [En línea]. Available: <https://cooperaccion.org.pe/>. [Último acceso: 2024].
- [3] M. A. J. Ferrel, *Análisis experimental de la función de transferencia de la máquina de inducción trifásica operando como generador*, Cusco: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, 2013.
- [4] L. M. H. Angeles, *Optimización del mantenimiento preventivo a motores de rotor devanado de 3600 kw, con 6600 volts, que mueven molinos de cemento con capacidad de 120 toneladas por hora*, Mexico D.F.: Instituto Politecnico Nacional - Escuela Superior de Ingenieria Mecanica y Electrica, 2009.
- [5] W. P. Villavicencio, *Estudio para un programa de mantenimiento preventivo para reducir el elevado nivel de paras imprevisa en los motores eléctricos del departamento de Tostión en la empresa Gusnobe S.A.*, Ecuador: Universidad Estatal de Milagro, 2013.
- [6] S. K. S. D. K. V. S. SSSR Sarathbabu Duvvuri, «Broken Rotor Bar Fault in 3- Φ Squirrel-Cage Induction Motors: A Critical Observations,» *IEEE*, 2023.
- [7] V. K. Santosh Kumar Vishwakarma, «Study of optimization of squirrel cage induction motor using dcr technique,» *IRJETS*, 2023.
- [8] N. S. P. Sethupathi, «Comparative analysis of line-start permanent magnet synchronous motor and squirrel cage induction motor under customary power quality indices,» *Springer Link*, 2023.
- [9] Direccion General de Electricidad, Norma Tecnica de Calidad de los Servicios Electricos, Lima: Diario Oficial El Peruano, 2008.
- [10] OSINERG, Base metodologica para la aplicacion de la Norma Tecnica de Calidad de los Servicios Electricos, Lima: Diario Oficial El Peruano, 1998.
- [11] G. E. Harper, ABC de la Calidad de Energia, Mexico D.C.: LIMUZA, 1995.

- [12] H. G. Maslucan, Protecciones en Sistemas Electricos de Potencia, Lima: AUDIGENSAC, 2016.
- [13] E. Harper, Elementos de Proteccion de Sistemas Electricos, Mexico D.F.: LIMUSA, 2011.
- [14] F. C. C., El MAPIC, Puno: Sagitario, 2009.
- [15] C. D. S., Metodologia de la investigacion cientifica, Lima: San Marcos, 2009.
- [16] R. H. Sampieri, Metodologia de la investigacion, Mexico D.F.: McGrawHill, 2014.
- [17] L. Alvarez, Matriz de fallas de los motores de induccion, Cuba: Instituop Superior Politecnico Jose Antonio Echevarria, 2007.
- [18] G. Peralta, Diagnostico de fallas de motores de induccion, Huancayo: Universidad Nacional del Centro, 2009.
- [19] A. Frieser, Motores electricos: Claves para un correcto mantenimiento, DataScope, 2020.
- [20] E. Gutierrez, Analisis de criticidad integral de activos, Predictiva21, 2021.
- [21] J. Thaler, Máquinas Eléctricas, México: Editorial Limusa, 1974

WEBGRAFIA

Wooddhause. 1994. The Woodhouse Paetnership Limited. PDVSA-INTEVP.
<https://angelmendizabal.com/mantenimiento/ejemplo-practico-para-realizar-un-analisis-de-criticidad/>

ANEXO I

Encuesta para determinar la Criticidad del Motor de Inducción

Objetivo: Recopilar información sobre los componentes críticos y su impacto en la operación del motor de inducción.

Instrucciones:

Por favor, responda cada pregunta y marque con una x según su experiencia y conocimiento sobre el motor de inducción que utiliza en su entorno laboral. Utilice las escalas y opciones proporcionadas.

1. **¿Con qué frecuencia experimenta fallos en los componentes principales del motor de inducción?**
 - ☐ Muy frecuentemente
 - ☐ Frecuentemente
 - ☐ Ocasionalmente
 - ☐ Raramente
 - ☐ Nunca
2. **En su experiencia, ¿qué componente del motor de inducción falla con mayor frecuencia?**
 - ☐ Rodamientos
 - ☐ Devanados del estator
 - ☐ Jaula de ardilla del rotor
 - ☐ Eje o flecha
 - ☐ Otros (especificar): _____
3. **¿Cuál es el impacto en la producción cuando se presenta un fallo en los rodamientos?**
 - ☐ Bajo
 - ☐ Moderado
 - ☐ Alto
 - ☐ Crítico
4. **¿Qué tan crítica considera la falla de los devanados del estator para la operación del motor?**
 - ☐ No crítica
 - ☐ Moderadamente crítica

- Muy crítica
 - Extremadamente crítica
5. **¿Qué importancia le asigna al análisis de excentricidad del eje o flecha del motor?**
- Sin importancia
 - Baja importancia
 - Moderada importancia
 - Alta importancia
6. **¿Qué tan frecuentes son las inspecciones preventivas para los componentes considerados críticos?**
- Semanalmente
 - Mensualmente
 - Cada 3 meses
 - No se realizan inspecciones regulares
7. **¿Qué medidas preventivas se toman para minimizar el fallo en los rodamientos?**
- Lubricación periódica
 - Monitoreo de vibraciones
 - Sustitución preventiva
 - No se realizan acciones específicas
8. **¿Qué tan significativa considera la falla en la jaula de ardilla del rotor respecto al rendimiento general del motor?**
- Sin importancia
 - Baja
 - Moderada
 - Alta
9. **¿Cuenta con un sistema de monitoreo continuo para los parámetros críticos del motor (vibración, temperatura, corriente, etc.)?**
- Sí
 - No
10. **En su opinión, ¿cuál es el componente del motor que requiere más atención en el Plan de Mantenimiento Preventivo?**
- Rodamientos
 - Devanados del estator
 - Núcleo del rotor
 - Eje o flecha

- Otros (especificar): _____

Gracias por completar la encuesta. Sus respuestas contribuirán a optimizar el análisis de criticidad y la planificación del mantenimiento preventivo de los motores de inducción

ANEXO II

Encuesta para determinar la Matriz de falla del Motor de Inducción

Objetivo: Identificar el modo de fallo, la causa del fallo, el efecto del fallo y los controles aplicados en los motores de inducción para mejorar el mantenimiento preventivo.

Instrucciones:

Responda las siguientes preguntas basándose en su experiencia y conocimientos técnicos.

12. Modo de Fallo

1. ¿Cuál considera que es el modo de fallo más recurrente en el aislamiento del estator?
 - Sobrecarga eléctrica
 - Envejecimiento natural
 - Contaminación por polvo o humedad
 - Otros (especificar): _____
2. ¿Qué tipo de fallos son más comunes en el rotor del motor de inducción?
 - Rotura de barras
 - Desbalance
 - Desgaste por fricción
 - Otros (especificar): _____
3. ¿Con qué frecuencia se presentan fallos de excentricidad en el rotor?
 - Muy frecuentemente
 - Frecuentemente
 - Ocasionalmente
 - Raramente
4. ¿Qué fallos suelen ocurrir en la cubierta posterior del motor?
 - Daños por impacto
 - Aflojamiento de tornillos
 - Desgaste del material
 - Otros (especificar): _____

13. Causa del Fallo

5. ¿Cuáles son las causas principales de los fallos en los rodamientos del motor?
 - Lubricación insuficiente
 - Contaminación externa
 - Carga desbalanceada

- Otros (especificar): _____
- 6. ¿Qué factores contribuyen al fallo del núcleo del rotor?
 - Sobrecargas mecánicas
 - Pérdidas por corrientes parásitas
 - Daños por vibraciones
 - Otros (especificar): _____
- 7. ¿Qué condiciones ambientales afectan más la carcasa del motor?
 - Humedad
 - Corrosión por químicos
 - Vibraciones constantes
 - Otros (especificar): _____
- 8. ¿Qué factores suelen causar fallos en el ventilador del motor?
 - Desgaste mecánico
 - Bloqueo por residuos
 - Sobrecargas eléctricas
 - Otros (especificar): _____
- 9. ¿Qué problemas en la instalación eléctrica podrían originar fallos en la caja de conexiones?
 - Conexiones flojas
 - Sobrecargas eléctricas
 - Falsos contactos
 - Otros (especificar): _____
- 10. ¿Qué errores en el mantenimiento pueden contribuir al fallo de la base de fijación?
 - Instalación incorrecta
 - Falta de ajustes periódicos
 - Materiales de baja calidad
 - Otros (especificar): _____

14. Efecto del Fallo

- 11. ¿Qué consecuencias tiene un fallo en los devanados del estator?
 - Incremento en el consumo eléctrico
 - Paro inmediato del motor
 - Daño a otros componentes eléctricos
 - Otros (especificar): _____
- 15. ¿Qué impacto tiene un fallo en el eje o flecha del motor sobre el rendimiento general?

- Aumento de vibraciones
- Daño a los rodamientos
- Desgaste de componentes acoplados
- Otros (especificar): _____

13. ¿Qué problemas puede causar una desalineación en el rotor?

- Aumento de la temperatura
- Ruido excesivo
- Pérdida de eficiencia operativa
- Otros (especificar): _____

14. ¿Qué efectos podría tener un fallo en la placa de características del motor?

- Información incorrecta para el mantenimiento
- Confusión en la selección de piezas de repuesto
- Dificultades en la operación segura
- Otros (especificar): _____

15. ¿Cómo afecta un fallo en los rodamientos al resto del sistema del motor?

- Desgaste prematuro del eje
- Incremento en las vibraciones
- Daño en las conexiones eléctricas internas
- Otros (especificar): _____

16. Control del Fallo

16. ¿Qué controles utiliza para monitorear las condiciones de los rodamientos?

- Análisis de vibraciones
- Verificación de lubricación
- Inspección térmica
- Otros (especificar): _____

17. ¿Qué frecuencia recomienda para las inspecciones del aislamiento del estator?

- Mensual
- Trimestral
- Semestral
- Anual

18. ¿Qué herramientas son más efectivas para diagnosticar fallos en el rotor?

- Análisis de corriente
- Monitoreo de temperatura
- Pruebas de resistencia

- Otros (especificar): _____

19. ¿Qué medidas de mantenimiento se aplican para prolongar la vida útil del ventilador del motor?

- Limpieza regular
- Inspección visual
- Reemplazo programado
- Otros (especificar): _____

20. ¿Qué controles se implementan para prevenir fallos en la carcasa del motor?

- Aplicación de recubrimientos anticorrosión
- Inspección periódica
- Ajuste de fijaciones
- Otros (especificar): _____

Gracias por su colaboración!

Las respuestas ayudarán a identificar y optimizar las estrategias de mantenimiento preventivo en motores de inducción.

ANEXO III

MATRIZ DE FALLAS DEL MOTOR TRIFÁSICO DE INDUCCIÓN					
COMPONENTE	PROCESO	MODOS DE FALLO	EFFECTO	CAUSA	CONTROLES PREVENTIVOS
ESTATOR	MANTTO DEL ESTATOR	MOTOR NO ARRANCA - I	MOTOR INOPERATIVO	PROBLEMAS EN EL SUMINISTRO DE ENERGIA	REVISIÓN DEL TABLERO DE CONTROL Y MANDO
ESTATOR	MANTTO DEL ESTATOR	MOTOR NO ARRANCA - II	MOTOR INOPERATIVO	PROBLEMAS EN SISTEMA DE CONTROL Y MANDO	REVISIÓN DEL TABLERO DE CONTROL Y MANDO
ESTATOR	MANTTO DEL ESTATOR	MOTOR NO ARRANCA -III	MOTOR INOPERATIVO	CIRCUITOS ABIERTOS O DESCONECTADOS DEL ESTATOR	REVISIÓN DEL TABLERO DE CONTROL Y MANDO
ESTATOR	MANTTO DEL ESTATOR	MOTOR NO ARRANCA - IV	MOTOR INOPERATIVO	DISPAROS DE SOBRECARGA	REVISIÓN DEL TABLERO DE CONTROL Y MANDO
ESTATOR	MANTTO DEL ESTATOR	FALLO POR AISLAMIENTO ELÉCTRICO - I	SOBRECORRIENTES EN LA BOBINA PÉRDIDAS E INCREMENTO DE $\uparrow$	DETERIORO DE AISLAMIENTOS ENTRE ESPIRAS - CORTOCIRCITOS	PRUEBAS DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO Y REPARACIÓN, TERMOGRAFÍA
ESTATOR	MANTTO DEL ESTATOR	FALLO POR AISLAMIENTO ELÉCTRICO - II	SOBRECORRIENTES EN LA BOBINA PÉRDIDAS E INCREMENTO DE $\uparrow$	AFLORAMIENTO DE BOBINAS	PRUEBAS DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO Y REPARACIÓN, TERMOGRAFÍA
ESTATOR	MANTTO DEL ESTATOR	FALLO POR AISLAMIENTO ELÉCTRICO - III	PÉRDIDA DEL NIVEL DE AISLAMIENTO Y PÉRDIDAS	DELAMINACIÓN DE AISLANTES	REPARACIÓN O REEMPLAZO DEL AISLAMIENTO, MEJORA DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN, EVITAR SOBRECARGAS
ESTATOR	MANTTO DEL ESTATOR	FALLO POR AISLAMIENTO ELÉCTRICO - IV	PÉRDIDA DEL NIVEL DE AISLAMIENTO Y PÉRDIDAS	ENVEJECIMIENTO	REPARACIÓN O REEMPLAZO DEL AISLAMIENTO, MEJORA DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN, EVITAR SOBRECARGAS
ESTATOR	MANTTO DEL ESTATOR	SOBRETENSIÓN EXTERNA	PARADA DE MOTOR POR ACCIONAMIENTO DE SISTEMA DE PROTECCIÓN	DESCARGAS ATMOSFERICAS	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO, CORRECCIÓN DEL PROBLEMA, VERIFICACIÓN DE LA CAUSA
ESTATOR	MANTTO DEL ESTATOR	SOBRETENSIÓN INTERNA Y PRESENCIA DE ARMÓNICOS	PARADA DE MOTOR POR ACCIONAMIENTO DE SISTEMA DE PROTECCIÓN	EFFECTO SWICHING (VARIACIONES DE FRECUENCIA)	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO, CORRECCIÓN DEL PROBLEMA, VERIFICACIÓN DE LA CAUSA
ESTATOR	MANTTO DEL ESTATOR	SOBRETENSIÓN INTERNA	PARADA DE MOTOR POR ACCIONAMIENTO DE SISTEMA DE PROTECCIÓN	PROBLEMAS DE SUMINISTRO (VARIACIONES DE TENSIÓN)	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO, CORRECCIÓN DEL PROBLEMA, VERIFICACIÓN DE LA CAUSA

COMPONENTE	PROCESO	MODOS DE FALLO	EFFECTO	CAUSA	CONTROLES
ROTOR	MANTTO DEL ROTOR	FALLA EN BARRA - I	RUIDO ANORMALES	ROTURA DE BARRA POR DEFECTO DEL MATERIAL	REEMPLAZO DE LA BARRA DEL ROTOR, ANÁLISIS DE LA CAUSA RAÍZ, INSPECCIÓN DE LAS BARRAS RESTANTES, CALIDAD DEL MATERIAL
ROTOR	MANTTO DEL ROTOR	FALLA EN BARRA - II	SOBRECALENTAMIENTO Y PARADA DEL MOTOR	ROTURA DE BARRA FLOJA	REEMPLAZO DE LA BARRA DEL ROTOR, ANÁLISIS DE LA CAUSA RAÍZ, INSPECCIÓN DE LAS BARRAS RESTANTES, CALIDAD DEL MATERIAL
ROTOR	MANTTO DEL ROTOR	FALLA EN BARRA - III	SOBRECALENTAMIENTO Y PARADA DEL MOTOR	ROTURA DE BARRA POR INCORRECTO RÉGIMEN DE ARRANQUE	REEMPLAZO DE LA BARRA DEL ROTOR, ANÁLISIS DE LA CAUSA RAÍZ, INSPECCIÓN DE LAS BARRAS RESTANTES, CALIDAD DEL MATERIAL
ROTOR	MANTTO DEL ROTOR	FALLA EN BARRA - IV	SOBRECALENTAMIENTO Y PARADA DEL MOTOR	FRACTURA POR DEFECTO DE SOLDADURA	REEMPLAZO DE LA BARRA DEL ROTOR, ANÁLISIS DE LA CAUSA RAÍZ, INSPECCIÓN DE LAS BARRAS RESTANTES,
ROTOR	MANTTO DEL ROTOR	DAÑO ACERO ACTIVO - I	RUIDOS ANORMALES E INCREMENTO DE TEMPERATURA	FRICCIÓN POR GOLPES ACCIDENTALES	IDENTIFICACION DE ZONA DE DAÑO, MAYOR SEGURIDAD DE MANIOBRA
ROTOR	MANTTO DEL ROTOR	DAÑO ACERO ACTIVO - II	RUIDOS ANORMALES E INCREMENTO DE TEMPERATURA	FRICCIÓN POR CUÑAS SUELTAS	IDENTIFICACIÓN DE ZONA DE DAÑO, AJUSTAR LAS CUÑAS O CAMBIARLAS
ROTOR	MANTTO DEL ROTOR	DAÑO ACERO ACTIVO - III	RUIDOS ANORMALES E INCREMENTO DE TEMPERATURA	FRICCIÓN POR FALLA EN RODAMIENTOS	REVISAR CARGA, TEMPERATURA DEL RODAMIENTO, VER PROCEDIMIENTO DE MANTTO
ROTOR	MANTTO DEL ROTOR	DAÑO ACERO ACTIVO - IV	SOBRECALENTAMIENTO Y PARADA DEL MOTOR	FALLO POR ARCO EN BARRA ROTA Y FLOJA	CAMBIO DE COMPONENTE DAÑADO, REVISIÓN DE LAS
ROTOR	MANTTO DEL ROTOR	FRACTURA O FLEXIÓN DEL EJE - I	CALENTAMIENTO Y PARADA DEL MOTOR	CONCENTRACIÓN DE TENSIONES	REVISAR LA CARGA, CAMBIO DE MOTOR
ROTOR	MANTTO DEL ROTOR	FRACTURA O FLEXIÓN DEL EJE - II	CALENTAMIENTO Y PARADA DEL MOTOR	EXCESO DE CARGA	REVISAR LA CARGA, CAMBIO DE MOTOR
ROTOR	MANTTO DEL ROTOR	PÉRDIDAS DE AJUSTE EN ZONA DE RODAMIENTO - I	RUIDOS ANORMALES Y DISMINUCIÓN DE LA VELOCIDAD	DESPLAZAMIENTO DEL RODAMIENTO	REVISAR LA CARGA, AJUSTE DEL RODAMIENTO
ROTOR	MANTTO DEL ROTOR	PÉRDIDAS DE AJUSTE EN ZONA DE RODAMIENTO - II	RUIDOS ANORMALES Y DISMINUCIÓN DE LA VELOCIDAD	AJUSTE INADECUADO DEL RODAMIENTO	REVISAR LA CARGA, AJUSTE DEL RODAMIENTO
ROTOR	MANTTO DEL ROTOR	DESBALANCE - I	RUIDOS ANORMALES E INCREMENTO DE TEMPERATURA	FLEXIÓN	REVISAR LA CARGA, BALANCEO DEL ROTOR RODAMIENTO
ROTOR	MANTTO DEL ROTOR	DESBALANCE - II	RUIDOS ANORMALES E INCREMENTO DE TEMPERATURA	DESPLAZAMIENTO DE MASAS	REVISAR LA CARGA, BALANCEO DEL ROTOR
ROTOR	MANTTO DEL ROTOR	DESBALANCE - III	RUIDOS ANORMALES E INCREMENTO DE TEMPERATURA	RESIDUAL DE FÁBRICA	REVISAR EL ROTOR, RETIRAR LOS RESIDUALES Y LAS REBABAS
ROTOR	MANTTO DEL ROTOR	DAÑOS EN EL NÚCLEO MAGNÉTICO DEL ROTOR	RUIDOS ANORMALES E INCREMENTO DE TEMPERATURA	ROZAMIENTO DEL ROTOR DESVIACIÓN DEL ENTREHIERRO	REVISAR LA CARGA, BALANCEO DEL ROTOR, REVISAR RODAMIENTO

COMPONENTE	PROCESO	MODOS DE FALLO	EFEECTO	CAUSA	CONTROLES
RODAMIENTOS	MANTTO DEL RODAMIENTO	VIBRACIONES ELEVADAS - I	RUIDO EXCESIVO Y DETERIORO DE AISLAMIENTO	SOLTURA MECÁNICA	INSPECCIÓN VISUAL Y AUDITIVA, AJUSTE DE LAS TOLERANCIAS
RODAMIENTOS	MANTTO DEL RODAMIENTO	VIBRACIONES ELEVADAS - II	DESGASTE DE RODAMIENTOS Y FALLA	DESALINEAMIENTO: PARALELO, ANGULAR COMBINADO	ALINEAR EL MOTOR Y LA CARGA, CAMBIO DE RODAMIENTO
RODAMIENTOS	MANTTO DEL RODAMIENTO	VIBRACIONES ELEVADAS - III	INESTABILIDAD DEL SISTEMA MECÁNICO	DESBALANCE	ALINEAR EL MOTOR Y LA CARGA, BALANCEO, CAMBIO DE RODAMIENTO
RODAMIENTOS	MANTTO DEL RODAMIENTO	FALLA DEL ELEMENTO RODANTE (BOLAS O CILINDROS) - I	DISMINUCIÓN DE VELOCIDAD	EXCESIVA LUBRICACIÓN	ALINEACIÓN DEL MOTOR, CONTROL DE LUBRICACIÓN, REEMPLAZO DE RODAMIENTOS
RODAMIENTOS	MANTTO DEL RODAMIENTO	FALLA DEL ELEMENTO RODANTE (BOLAS O CILINDROS) - II	RUIDOS ANORMALES E INCREMENTO DE TEMPERATURA	LUBRICACIÓN DEFECTUOSA	ALINEACIÓN DEL MOTOR, CONTROL DE LUBRICACIÓN, REEMPLAZO DE
RODAMIENTOS	MANTTO DEL RODAMIENTO	FALLA DEL ELEMENTO RODANTE (BOLAS O CILINDROS) - III	RUIDOS ANORMALES E INCREMENTO DE TEMPERATURA	VIBRACIONES EN REPOSO	INSPECCIÓN VISUAL Y AUDITIVA, AJUSTE DE LAS TOLERANCIAS
RODAMIENTOS	MANTTO DEL RODAMIENTO	FALLA DEL ELEMENTO RODANTE (BOLAS O CILINDROS) - IV	RUIDOS ANORMALES E INCREMENTO DE TEMPERATURA	CORRIENTE POR EL COJINETE (FLUTING)	INSPECCIÓN TOTAL DEL RODAMIENTO, REEMPLAZO DE RODAMIENTOS
RODAMIENTOS	MANTTO DEL RODAMIENTO	FALLA DEL ELEMENTO RODANTE (BOLAS O CILINDROS) - V	DISMINUCIÓN DE VELOCIDAD	INADECUADO MONTAJE O SELECCIÓN	ALINEACIÓN DEL MOTOR, CONTROL DE CARGA, REVISIÓN DEL ALINEAMIENTO
RODAMIENTOS	MANTTO DEL RODAMIENTO	FALLA DEL ELEMENTO RODANTE (BOLAS O CILINDROS) - VI	RUIDOS ANORMALES E INCREMENTO DE TEMPERATURA	CONTAMINACIÓN	INSPECCIÓN TOTAL DEL RODAMIENTO, EVALUACIÓN AMBIENTAL
RODAMIENTOS	MANTTO DEL RODAMIENTO	FALLA DEL ELEMENTO RODANTE (BOLAS O CILINDROS) - VII	RUIDOS ANORMALES E INCREMENTO DE TEMPERATURA	SOBRECARGA	INSPECCIÓN TOTAL DEL RODAMIENTO, REVISIÓN DE CARGA
RODAMIENTOS	MANTTO DEL RODAMIENTO	VIBRACIÓN EN RODAMIENTOS DE FRICCIÓN I	RUIDOS ANORMALES E INCREMENTO DE TEMPERATURA	FALTA LUBRICACIÓN	INSPECCIÓN TOTAL DEL RODAMIENTO, REVISIÓN DEL LUBRICANTE
RODAMIENTOS	MANTTO DEL RODAMIENTO	VIBRACIÓN EN RODAMIENTOS DE FRICCIÓN II	RUIDOS ANORMALES E INCREMENTO DE TEMPERATURA	HOLGURA DE CONTACTO EXCESIVA	INSPECCIÓN TOTAL DEL RODAMIENTO, AJUSTE DE TOLERANCIAS
RODAMIENTOS	MANTTO DEL RODAMIENTO	VIBRACIÓN EN RODAMIENTOS DE FRICCIÓN III	RUIDOS ANORMALES E INCREMENTO DE TEMPERATURA	ROTURA DE RETEN	INSPECCIÓN TOTAL DEL RODAMIENTO, REEMPLAZO DE RODAMIENTOS
RODAMIENTOS	MANTTO DEL RODAMIENTO	VIBRACIÓN EN RODAMIENTOS DE FRICCIÓN	RUIDOS ANORMALES E INCREMENTO DE TEMPERATURA	SUCIEDAD EN ZONA DE LUBRICACIÓN	INSPECCIÓN TOTAL DEL RODAMIENTO, EVALUACIÓN AMBIENTAL
RODAMIENTOS	MANTTO DEL RODAMIENTO	VIBRACIÓN EN RODAMIENTOS DE FRICCIÓN V	RUIDOS ANORMALES E INCREMENTO DE TEMPERATURA	SUCIEDAD EN EL COJINETE	INSPECCIÓN TOTAL DEL RODAMIENTO, EVALUACIÓN AMBIENTAL
RODAMIENTOS	MANTTO DEL RODAMIENTO	VIBRACIÓN EN RODAMIENTOS DE FRICCIÓN VI	RUIDOS ANORMALES E DISMINUCIÓN DE VELOCIDAD	ERROR DE MONTAJE	INSPECCIÓN TOTAL DEL RODAMIENTO, DESARROLLAR UN NUEVO MONTAJE
RODAMIENTOS	MANTTO DEL RODAMIENTO	VIBRACIÓN EN RODAMIENTOS DE FRICCIÓN VII	RUIDOS ANORMALES E INCREMENTO DE TEMPERATURA	CORROSIÓN	INSPECCIÓN TOTAL DEL RODAMIENTO, EVALUACIÓN AMBIENTAL
RODAMIENTOS	MANTTO DEL RODAMIENTO	VIBRACIÓN EN RODAMIENTOS DE FRICCIÓN VIII	RUIDOS ANORMALES E DISMINUCIÓN DE VELOCIDAD	SOBRECARGA	INSPECCIÓN TOTAL DEL RODAMIENTO, REVISIÓN DE CARGA
RODAMIENTOS	MANTTO DEL RODAMIENTO	VIBRACIÓN EN RODAMIENTOS DE FRICCIÓN IX	RUIDOS ANORMALES E INCREMENTO DE TEMPERATURA	CAVITACIÓN	ALINEACIÓN DEL MOTOR, CONTROL DE CARGA, REVISIÓN DEL ALINEAMIENTO