

MANTENIMIENTO DE MOTORES DE INDUCCIÓN

JORGE ALEXANDER LEÓN GARCÍA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2007

MANTENIMIENTO DE MOTORES DE INDUCCIÓN

JORGE ALEXANDER LEÓN GARCÍA

**Tesis de grado presentada como requisito final para optar al título de
ingeniero electricista**

Director

José Gabriel Plata Cordero

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2007**

A mi padre Jorge
A mi madre Elizabeth
A mis hermanos, Christian y Oscar
A mi amiga Laura Rocío
A mi familia y amigos

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

Profesor José Gabriel Plata por su apoyo, colaboración y valiosos aportes en este proceso de aprendizaje.

Profesores: Hermann Vargas, Arnulfo Galán y demás docentes de la carrera de Ingeniería Eléctrica, por todas las experiencias y vivencias compartidas.

A los compañeros electricistas dedicados a la búsqueda del conocimiento y al crecimiento profesional, de los cuales conservo muy gratos recuerdos.

A todas las personas y entidades que en algún momento brindaron su colaboración para el desarrollo de esta investigación, en especial, las que me acogieron en los semestres de práctica.

ECOPETROL S.A., en especial los ingenieros Juan Carlos Toro Muñoz y Tulio Hernando López Cortés.

INTERCONEXIÓN ELÉCTRICA S.A. E.S.P., en especial los ingenieros William Hernán Santana Achury y Carlos Eduardo Benavides Atehortua.

RESUMEN

TÍTULO:
MANTENIMIENTO DE MOTORES DE INDUCCIÓN *

AUTOR:
JORGE ALEXANDER LEÓN GARCÍA **

PALABRAS CLAVE: **Correctivo, mantenimiento, máquina, motor, predictivo, preventivo, rotativa.**

DESCRIPCIÓN:

El mantenimiento es uno de los aspectos que más ha influido en las políticas de servicio y calidad en la industria moderna, ya que por medio de éste se alcanzan altos niveles de confiabilidad en los procesos y en la continuidad de servicio a un costo justificable. El personal involucrado con el mantenimiento está comprometido a que las actividades se ejecuten de una manera más segura, efectiva y económicamente viable; por esto cada vez se realizan más investigaciones en las diferentes técnicas, en el mejoramiento de las herramientas y en la manera de integración con los demás procesos administrativos enmarcados en el gerenciamiento estratégico del negocio.

Por eso, gracias al trabajo desempeñado por la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones en su primer trabajo sobre mantenimiento de transformadores de potencia y por los conocimientos adquiridos en las empresas del sector energético del país durante los semestres de práctica, hoy se puede contar con el segundo tratado aplicado a los motores de inducción.

El documento se conforma de una parte dedicada a mostrar las partes fundamentales del motor de inducción que sirve como referencia para la aplicación de las diferentes técnicas de mantenimiento. Además se exponen las diferentes estrategias empleadas en el modelo de gestión del mantenimiento centrado en la confiabilidad. Por último, se aplican a los motores de inducción cada una de las estrategias que actualmente son empleadas por la industria nacional y se presenta una guía básica de mantenimiento correctivo basado en normas y estándares relacionados con las máquinas rotativas.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ciencias Físico-Mecánicas, Ingeniería Eléctrica
José Gabriel Plata Cordero

SUMMARY

TITLE:

INDUCTION MOTOR MAINTENANCE *

AUTHOR:

JORGE ALEXANDER LEÓN GARCÍA **

KEYWORDS: **Corrective, maintenance, machine, motor, predictive, preventive, rotating.**

DESCRIPTION:

The maintenance is one of the aspects that more it has influenced in the politicians of service and quality in the modern industry, since by means of this high levels of dependability are reached in the processes and in the continuity of service at a justifiable cost. The personnel involved with the maintenance is committed to that the activities are executed in a more sure, effective and economically viable way; for this reason every time they are carried out more investigations in the different ones technical, in the improvement of the tools and in the integration way with the other administrative processes framed in the strategic control of the business.

For that reason, thanks to the work carried out by the School of Electric, Electronic Engineering and of Telecommunications in their first work on maintenance of transformers of power and for the knowledge acquired in the companies of the energy sector of the country during the practice semesters, today it can have the second treaty applied to the induction motors.

The document conforms to of a part dedicated to show the fundamental parts of the induction motor that it serves like reference for the application of the different maintenance techniques. The different strategies are also exposed used in the pattern of administration of the maintenance centered in the dependability. Lastly, they are applied to the induction motors each one of the strategies that at the moment they are employees for the national industry and a basic guide of maintenance corrective is presented based on norms and standard related with the revolving machines.

* Degree Work

** Physics and Mechanics Engineering Collage, Electrical Engineering
José Gabriel Plata Cordero

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN	vi
SUMMARY	vii
CONTENIDO	viii
LISTA DE TABLAS.....	xi
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE ANEXOS	xiv
INTRODUCCIÓN	1
1 EL MOTOR DE INDUCCIÓN	2
1.1 Principio de funcionamiento	3
1.2 Partes constitutivas	4
1.3 Clasificación.....	12
2 FILOSOFÍA DEL MANTENIMIENTO	13
2.1 Gestión del mantenimiento	13
2.2 Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad	18
3 MANTENIMIENTO CORRECTIVO DE MOTORES DE INDUCCIÓN	30
3.1 Criterios para el mantenimiento reactivo.....	30
3.2 Zona de fallas en motores de inducción.....	31
3.3 Causas de falla común en motores.....	34
3.4 Reparación mecánica	40
3.5 Reparación eléctrica	46
3.6 Recomendaciones para el rebobinado de la máquina	52
4 MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE MOTORES DE INDUCCIÓN	54

4.1	Frecuencias	54
4.2	Procedimiento	60
4.3	Valores de aceptación de las pruebas	71
5	MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE MOTORES DE INDUCCIÓN	77
5.1	Monitoreo de vibraciones	78
5.2	Termografía infrarroja	80
5.3	Análisis del lubricante	83
5.4	Análisis de espectro de corrientes del motor (MCSA).....	86
5.5	Temperatura de los rodamientos	88
5.6	Ultrasonido	89
5.7	Interferencia electromagnética	90
5.8	Descargas parciales.....	90
6	GUÍA DE PROCEDIMIENTO PARA EL MANTENIMIENTO DE MOTORES DE INDUCCIÓN	92
6.1	Intervención del motor de inducción.....	94
6.2	Inspecciones	95
6.3	Pruebas eléctricas previas al mantenimiento	99
6.4	Intervención	102
6.5	Pruebas eléctricas posteriores al mantenimiento.....	108
6.6	Evaluación	109
6.7	Pruebas previas a la operación.....	110
7	ANÁLISIS DE LAS PRINCIPALES NORMAS EMPLEADAS EN EL MANTENIMIENTO DE MOTORES DE INDUCCIÓN	113
7.1	EASA Std. AR100-2001	113
7.2	NETA	116
7.3	NFPA 70B	117

7.4	IEEE Std. 43-2000	118
7.5	IEEE Std. 95-2002	122
7.6	IEEE Std. 112-2004	126
7.7	IEEE Std. 56-1997	127
8	CONCLUSIONES	129
9	RECOMENDACIONES	131
	BIBLIOGRAFÍA	132
	ANEXOS	134

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Criterios para el mantenimiento reactivo	31
Tabla 2. Comparativo de porcentajes de zonas de ocurrencia de fallas	32
Tabla 3. Matriz de frecuencia de mantenimiento.....	55
Tabla 4. Frecuencias de lubricación de rodamientos (1).....	59
Tabla 5. Frecuencias de lubricación de rodamientos (2).....	59
Tabla 6. Valores mínimos de resistencia de aislamiento a una temperatura de 40 °C	72
Tabla 7. Valores mínimos de resistencia de aislamiento a una temperatura de 20 °C	72
Tabla 8. Factor de corrección de temperatura a 20 °C para las medidas de la resistencia de aislamiento	73
Tabla 9. Valores mínimos recomendados para el índice de polarización.....	74
Tabla 10. Valoración del aislamiento con base al índice de polarización.....	74
Tabla 11. Tabla de severidad de la vibración	75
Tabla 12. Límites de vibración.....	75
Tabla 13. Máxima amplitud permitida de vibración	76
Tabla 14. Acciones sugeridas basadas en el incremento de temperatura	82
Tabla 15. Distancias de seguridad en termografía recomendadas por la OSHA.	139
Tabla 16. Colores de las señales y su significado.....	141

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Corte transversal de un motor de inducción.....	2
Figura 2. Partes de un motor de inducción trifásico jaula de ardilla	4
Figura 3. Laminaciones del estator	5
Figura 4. Estator parcialmente devanado.....	6
Figura 5. Estator completo de una máquina de corriente alterna	7
Figura 6. Laminaciones del rotor tipo jaula de ardilla	8
Figura 7. Rotor jaula de ardilla parcialmente terminado	8
Figura 8. Rotor completo tipo jaula de ardilla	9
Figura 9. Detalle de los componentes de la carcasa del motor de inducción.....	9
Figura 10. Placa típica de datos característicos.....	11
Figura 11. Componentes del programa RCM.....	19
Figura 12. Tipos de falla	22
Figura 13. Zonas de fallas en los motores de inducción	31
Figura 14. Porcentaje de fallas según la zona de ocurrencia.....	32
Figura 15. Excentricidad estática	39
Figura 16. Excentricidad dinámica	40
Figura 17. Muestras de quemaduras en los cabezales del devanado de un estator	47
Figura 18. Medida de la resistencia de aislamiento contra tierra.....	63
Figura 19. Formas de onda para diferentes fallas empleando la prueba de sobreimpulso comparativo	65
Figura 20. Alineación por el método del láser óptico.....	70

Figura 21. Punto caliente debido a una conexión suelta en una de las fases del circuito de potencia	80
Figura 22. Termograma donde se muestra un sobrecalentamiento en los devanados del estator.....	82
Figura 23. Muestras de aceite para análisis de tribología	86
Figura 24. Espectros de corriente que sirven para la detección de barras rotas de la jaula.....	87
Figura 25. Falla en el aislamiento reconocida mediante una inspección visual.....	91
Figura 26. Diferencias de temperatura en los termogramas	137
Figura 27. Medición directa e indirecta en termografía	138

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Carta de soluciones a problemas en el motor de inducción	135
ANEXO B. Qué debe tener en cuenta un buen termógrafo.....	137
ANEXO C. Recomendaciones de seguridad en el trabajo eléctrico	140
ANEXO D. Protocolo de inspección del motor de inducción	144

INTRODUCCIÓN

El mantenimiento es uno de los aspectos que más ha influido en las políticas de servicio y calidad en la industria moderna, ya que por medio de éste se alcanzan altos niveles de confiabilidad en los procesos y en la continuidad de servicio a un costo justificable. El personal involucrado con el mantenimiento está comprometido en que las actividades se ejecuten de una manera más segura, efectiva y económicamente viable; por esto cada vez se realizan más investigaciones en las diferentes técnicas, en el mejoramiento de las herramientas y en la manera de integración con los demás procesos administrativos enmarcados en el gerenciamiento estratégico del negocio.

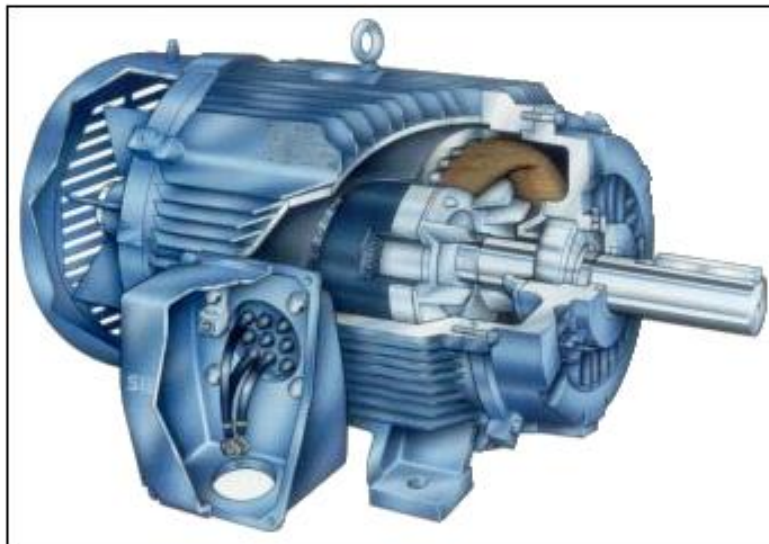
Por eso, gracias al trabajo desempeñado por la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones en un su primer trabajo sobre Mantenimiento de Transformadores de Potencia y por los conocimientos adquiridos en las empresas del sector energético del país durante los semestres de práctica, hoy se puede contar con el segundo tratado aplicado a los motores de inducción.

El documento se conforma de una parte dedicada a mostrar las partes fundamentales del motor de inducción que sirve como referencia para la aplicación de las diferentes técnicas de mantenimiento. Además se exponen las diferentes estrategias empleadas en el modelo de gestión del mantenimiento centrado en la confiabilidad. Por último se aplican a los motores de inducción cada una de las estrategias que actualmente son empleadas por la industria nacional, y se presenta una guía básica de mantenimiento correctivo basado en normas y estándares relacionados con las máquinas rotativas.

1 EL MOTOR DE INDUCCIÓN

El motor de inducción es una máquina eléctrica que entrega energía mecánica a una carga situada en el eje, a partir de la conversión de la energía eléctrica tomada de una fuente de potencia.

Figura 1. Corte transversal de un motor de inducción



Fuente: Application Manual for NEMA Motors, SIEMENS.

El motor de inducción se emplea principalmente en tareas residenciales, comerciales y aplicaciones industriales, debido a que es una máquina de construcción simple, de costo reducido, versátil, que cuenta con esquemas sencillos para el control y regulación del régimen de giro, y en gran parte a la facilidad de disponer de fuentes de energía eléctrica en cualquier sitio para su funcionamiento.

En diversas aplicaciones se requieren uno o varios motores que se acoplan mediante correas, cadenas, multiplicadores, reductores o directamente al eje de mecanismos como: bombas hidráulicas, compresores, ventiladores, bandas

transportadoras, etc., por esta razón las cargas mecánicas deben analizarse de manera conveniente para evitar posibles condiciones adversas que afecten la operación del motor de inducción.

El empleo de los motores eléctricos brinda mejores condiciones desde el punto de vista ambiental, debido a la gran ventaja que tienen sobre los motores que funcionan por medio de combustibles derivados del petróleo, que generan agentes contaminantes a causa del proceso de combustión, y además por la considerable reducción en los niveles de ruido emitidos al entorno circundante.

1.1 Principio de funcionamiento

En el principio de funcionamiento del motor de inducción interactúa un campo magnético giratorio creado en el estator debido a una corriente alterna, con un campo magnético opuesto inducido en el rotor. El resultado de la interacción produce un torque utilizable, el cual puede aprovecharse por las diferentes cargas mecánicas presentes en la planta.¹

El funcionamiento de todas las máquinas eléctricas está sujeto a las mismas leyes fundamentales; desde el punto de vista electromagnético, es suficiente con la comprensión de cuatro de éstas para entender el comportamiento.²

- Ley de Inducción de Faraday
- Leyes de Kirchhoff
- Ley del circuito del campo magnético (Ley de Ampere)
- Ley de la fuerza en un conductor en un campo magnético (Ley de Biot-Savart)

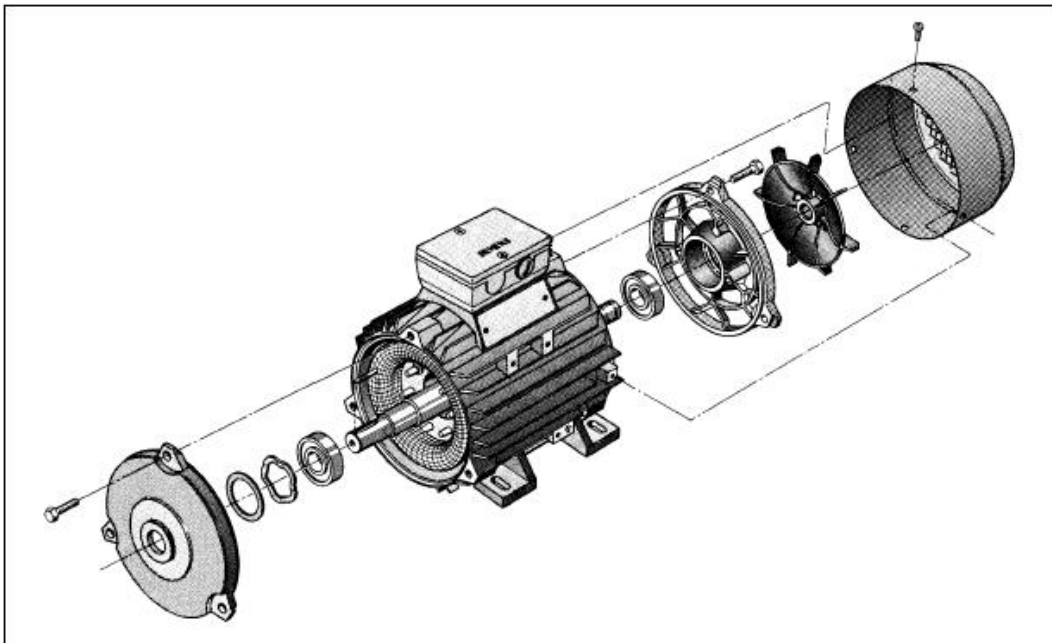
¹ Electrical Science, DOE-HDBK-1011/4-92. DOE: "Department of Energy" de los Estados Unidos.

² Para ampliar las definiciones se sugiere al lector referirse a los textos sobre teoría de máquinas eléctricas.

1.2 Partes constitutivas

Todas las máquinas eléctricas se componen de circuitos eléctricos acoplados magnéticamente, para esto es necesario contar con materiales que presenten un buen comportamiento eléctrico y magnético; además de otros que contribuyan principalmente con la función de aislamiento y refrigeración.

Figura 2. Partes de un motor de inducción trifásico jaula de ardilla



Fuente: Catálogo M11-2000, SIEMENS.

Básicamente las tres partes fundamentales del motor de inducción son: el estator, el rotor y la carcasa. A continuación se dará una breve descripción de cada una de ellas.

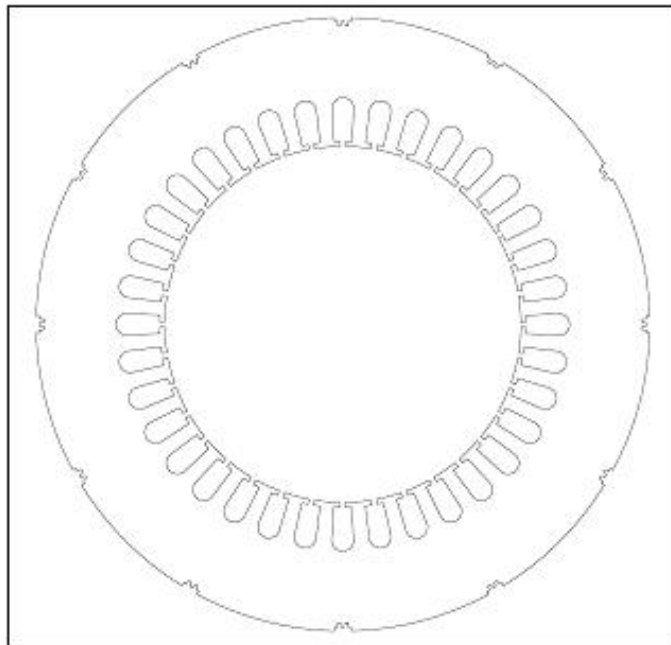
1.2.1 Estator

Es la parte estacionaria de la máquina, su función principal es generar el campo magnético giratorio que interactúa con el rotor, ésta se conecta a la fuente de

potencia eléctrica donde adquiere la energía necesaria para efectuar el proceso de inducción, y debido a esto, al estator se le conoce como el inductor de la máquina.

El estator está compuesto por varias láminas delgadas aisladas entre sí, que se apilan formando un cilindro hueco que a la vez forman las respectivas ranuras; y en cada una de ellas se insertan las bobinas aisladas que forman el devanado del estator, éstas por lo general se aseguran por medio de cuñas para evitar movimientos mecánicos que causen problemas de vibración.

Figura 3. Laminaciones del estator



Fuente: Step 2000, AC motors, SIEMENS.

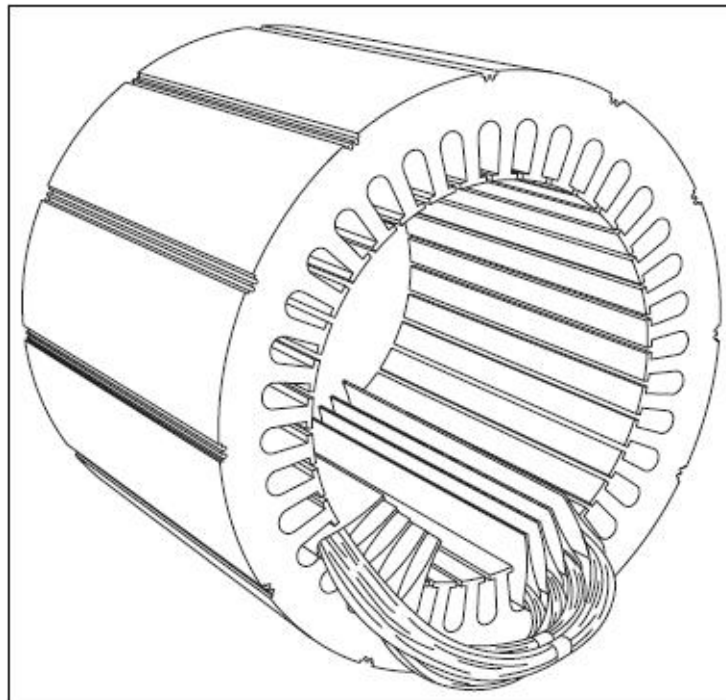
Al emplearse laminaciones para formar el núcleo del estator se minimizan las pérdidas provocadas principalmente por las corrientes de Eddy.¹ Los tratamientos y los materiales con que se fabrican las laminaciones del estator determinan la característica magnética o curva de magnetización, que se emplea principalmente

¹ Se recomienda al lector la consulta de la siguiente referencia para ampliar el concepto: Máquinas de corriente alterna de Michael Liwschitz-Garik.

en la operación de la máquina, además en ella también se aprecian algunos de los fenómenos como son el de saturación e histéresis.

Los arrollamientos o devanados del estator se emplean como camino para la corriente eléctrica necesaria para crear el flujo magnético principal que sirve de excitación a la máquina, éstos generalmente son fabricados con cobre y, se encuentran aislados entre sí y en cada una de las demás fases.

Figura 4. Estator parcialmente devanado

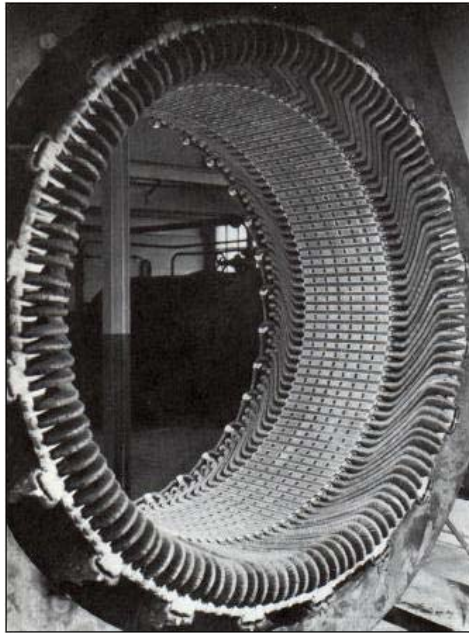


Fuente: Step 2000, AC motors, SIEMENS.

Los devanados se alojan en las ranuras del núcleo del estator que sirven de apoyo mecánico y donde cada conjunto de espiras se entrelaza por el mismo flujo magnético. Además, existen varios métodos de arrollamiento sobre el yugo dentro de los cuales los más conocidos y empleados son el aleatorio y el de bobinas preformadas.¹

¹ Para ampliar el concepto relacionado con los tipos y formas de arrollamiento, se recomienda la consulta del texto: "Rewinding and Repair of Electric Motors" de Karl Wilkinson.

Figura 5. Estator completo de una máquina de corriente alterna



Fuente: Sistemas electromecánicos, José Rodríguez.

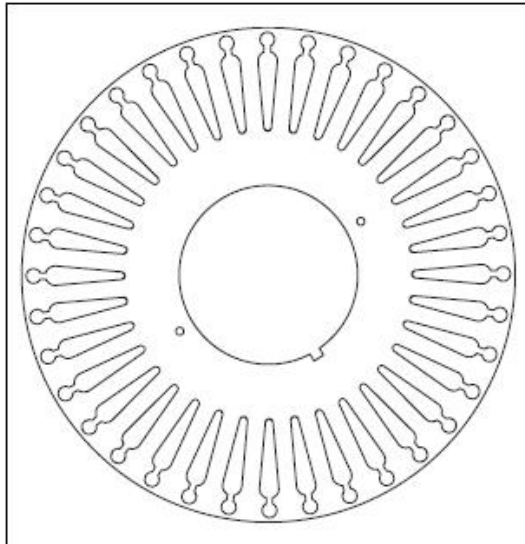
1.2.2 Rotor

Es la parte giratoria de la máquina, su función principal es entregar la potencia mecánica en el eje, para esto toma su energía por inducción del flujo magnético producido en el arrollamiento del estator, y debido a esto, al rotor se le conoce como el inducido de la máquina.

El tipo más común de los motores de inducción es el que se compone de un rotor jaula de ardilla, éste consiste de varios juegos de barras desnudas colocadas en las ranuras alrededor del núcleo del rotor y conectadas mecánica y eléctricamente en cada uno de sus extremos por un anillo.

La construcción del rotor de la jaula de ardilla evoca a las ruedas empleadas para el ejercicio que se encuentran en jaulas de los animales roedores domésticos. El rotor está compuesto por varias láminas delgadas aisladas entre sí, que se apilan formando el núcleo del inducido.

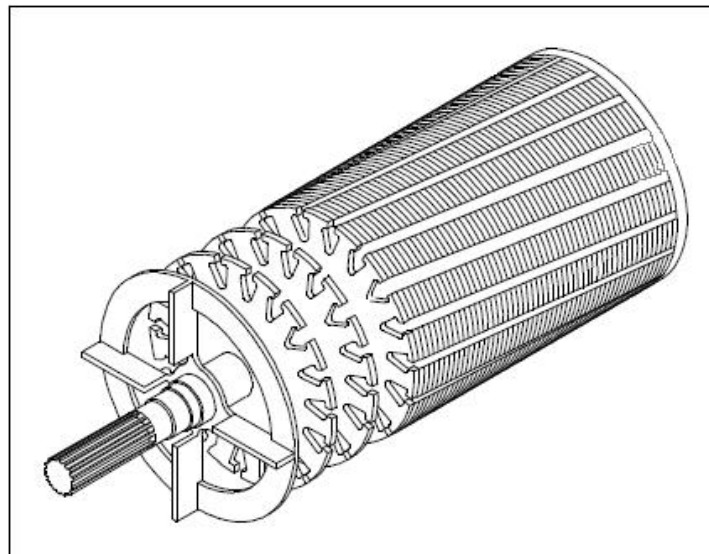
Figura 6. Laminaciones del rotor tipo jaula de ardilla



Fuente: Step 2000, AC motors, SIEMENS.

Se conoce con el nombre de entrehierro a la distancia dieléctrica que se encuentra entre el estator y el rotor, para el caso de las máquinas rotativas éste espacio se conforma principalmente de aire.

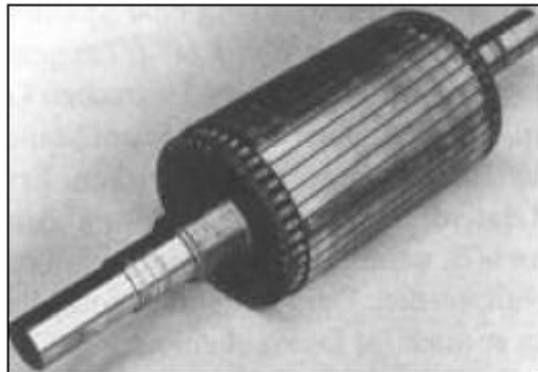
Figura 7. Rotor jaula de ardilla parcialmente terminado



Fuente: Electrical Science, DOE-HDBK-1011/4-92.

La profundidad, inclinación de las ranuras, disposición de las barras y configuraciones de la jaula de ardilla producen diferentes características en el arranque y funcionamiento de la máquina.¹

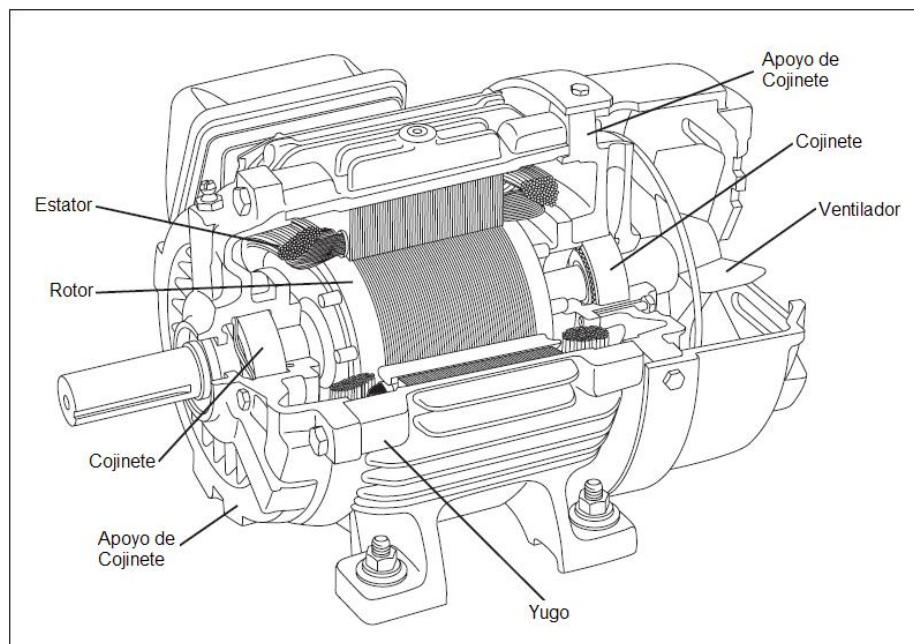
Figura 8. Rotor completo tipo jaula de ardilla



Fuente: Sistemas electromecánicos, José Rodríguez.

1.2.3 Carcasa

Figura 9. Detalle de los componentes de la carcasa del motor de inducción



Fuente: Step 2000, AC motors, SIEMENS.

¹ Máquinas de corriente alterna, Michael Liwshitz-Garik.

El encerramiento o lo que comúnmente se conoce con el nombre de carcasa, consiste en una armadura o yugo y dos soportes en el extremo que prestan la función de apoyo a los rodamientos. El estator se monta dentro del yugo y se fija fuertemente a él. El rotor se encaja dentro del estator manteniendo el entrehierro adecuado alrededor de todo el perímetro de la circunferencia para que no exista ninguna conexión física directa entre éstas dos partes.

La carcasa también protege contra los efectos dañinos del ambiente, en el cual el motor opera habitualmente, a la mayoría de las piezas eléctricas, mecánicas y elementos necesarios para el funcionamiento del motor. Los rodamientos o cojinetes, se montan en el eje, éstos apoyan el rotor y permiten el libre giro del mismo. Existen diversos tipos de rodamientos dentro de los cuales se encuentran el antifricción (bolas y rodillos) y el liso (manguito, chumacera). Además, en la mayoría de los motores se acopla un ventilador al eje para que desempeñe la labor fundamental en el proceso de refrigeración de la máquina.

También cabe mencionar algunos dispositivos que no forman parte integral del motor, pero que son prácticamente necesarios para el normal funcionamiento de la unidad, entre éstos se encuentra todo el sistema de fuerza y control involucrando los conductores que parten desde el centro de control de motores, pasando por la casilla donde están los sistemas de control y protección, recorriendo los conductos o bandejas portacables –algunas veces cárcamos– y llegando a la bornera o caja de conexiones del motor situado en el lugar mismo de trabajo.

Desde luego que hay que nombrar el sistema de aterrizamiento de la máquina dentro de este conjunto, cuya función principal se relaciona con la seguridad. Todos los motores deben contar con una placa de datos nominales característicos, que son de suma importancia para los procesos de administración, operación y mantenimiento de la unidad, ésta debe permanecer en un lugar visible sobre la superficie de la carcasa.

Figura 10. Placa típica de datos característicos

○ TYPE		3 PHASE		○	
FRAME		CARCASSE	HERTZ		
ENCLOSURE ENVELOPPE		MAX. AMB. TEMP TEMP. AMB. MAX.		°C	
		INSUL. CLASS CLASSE D'ISOL.			
VOLTS		AMPERES			
RPM	TPM	TIME RATING DUREE EN REG.		HRG. H	
FRONT BEARING PALIER AVANT			S.F.		F.S.
DRIVE BEARING PAL. COTE ENTRAIN.			EEMAC DESIGN		
SERIAL				NO. SERIE	
POIDS APPROX. WEIGHT			DATE CODE		
<div style="background-color: black; color: white; padding: 10px; margin: 10px auto; width: 80%;"> <p>HIGH EFFICIENCY MOTOR MOTOR A HAUTE EFFICACITE</p> </div>					
○ MADE IN CANADA		FABRIQUE AU CANADA		○	

Fuente: Preventive maintenance, Richard Okrasa.

Para algunos procesos o ambientes declarados como peligrosos o de alto riesgo se emplean accesorios propios de señalización e identificación, especialmente para la seguridad del personal e integridad de los demás equipos. En los motores de gran tamaño se encuentran dispositivos asociados a los sistemas de lubricación de los rodamientos y otros cuentan con puente grúas que se emplean principalmente en labores de instalación y mantenimiento.

Conforme la máquina aumenta en su potencia, en su complejidad de construcción y en la importancia en el proceso; aparecen nuevos elementos que se instalan principalmente para el monitoreo de las condiciones de operación y en las técnicas de mantenimiento predictivo, entre estos pueden nombrarse los detectores de temperatura por medio de resistencia (RTD¹) y demás sensores y transductores empleados en actividades relacionadas con la adquisición de datos y muestras.

¹ RTD: "Resistance Temperature Detectors".

1.3 Clasificación

La clasificación de los motores de inducción tiene diferentes connotaciones dependiendo del factor de discriminación o la forma de agrupamiento de las características más relevantes presentes en los mismos.

Existen clasificaciones que dependen de la construcción del rotor, del número de fases, de las velocidades que manejan, del tipo de carcasa, del tipo de servicio, de la clase del aislamiento, del nivel de tensión de operación, de la forma de posicionamiento, etc.; pero lo importante es determinar a cuál de éstas clasificaciones pertenece el equipo para tener en cuenta las recomendaciones que hacen los entes encargados de la administración, operación y mantenimiento de dichas unidades.

Dicho encasillamiento le sirve al delegado del mantenimiento para obtener un panorama de las normas y estándares que puede aplicarse en los procesos anteriormente nombrados. A continuación se mencionan algunas de estas clasificaciones a manera de información.¹

- Construcción del rotor: Jaula de ardilla y de rotor devanado.
- Número de fases: Monofásico y trifásico.
- Nivel de tensión: Baja y media tensión.
- Forma de posicionamiento: Horizontal y vertical.
- Tipo de encerramiento: Abiertos, cerrados, ventilación natural y forzada, a prueba de explosión, etc.

¹ Generalmente las clasificaciones son descritas en los manuales de consulta que ofrecen los fabricantes de máquinas rotativas.

2 FILOSOFÍA DEL MANTENIMIENTO

El mantenimiento es el trabajo que se requiere para mantener y preservar la planta en una condición satisfactoria para su propósito. Las labores de mantenimiento no se limitan simplemente a la intervención y reparación del equipo sino adicionalmente a la adecuación del entorno y demás aspectos que influyen en el funcionamiento.

Para varias compañías, el mantenimiento es una actividad que se ejecuta de una forma reactiva, por lo tanto éste es responsable de las interrupciones, averías y otros eventos infortunados.¹ Esto es especialmente crítico en plantas donde detener la producción conlleva a hacerse cargo de grandes pérdidas económicas, y es por esto que en la mayor parte de los casos el costo de mantenimiento puede justificarse de forma conveniente.

Es importante tener en cuenta que cada una de las estrategias que se empleen en el mantenimiento de equipos, deben siempre propender por la seguridad e integridad del personal, de la planta y de los aspectos medioambientales, minimizando hasta donde sea posible el costo asociado a dicha actividad.

2.1 Gestión del mantenimiento

Para que se logre una rentabilidad económica y una continuidad en el servicio se hace necesaria una interrelación permanente de los procesos de administración, operación y mantenimiento de los activos de una empresa, esto se logra cuando se alcanzan políticas de calidad concretas que estén acordes a cada uno de los procesos y desde luego con la planeación estratégica del negocio.

La gestión del mantenimiento involucra diversas actividades relacionadas con la administración de los recursos, como son: los equipos, herramientas, materiales y personal empleados para ejecutar las labores de mantenimiento; cuyo principal objetivo es la consecución de altos niveles de disponibilidad de los activos con un bajo impacto económico asociado.

Sin importar el modelo de gestión que se implemente de acuerdo a las necesidades de la empresa, siempre se tendrá como bases las estrategias de mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo; que son prácticamente las bases en las que se fundamenta el programa de mantenimiento centrado en la confiabilidad que muchos negocios actualmente han adoptado.

2.1.1 Mantenimiento Correctivo

El mantenimiento correctivo se compone de las acciones necesarias para la reparación y restauración de estructuras, sistemas y componentes que han fallado o están operando incorrectamente y no se encuentran desempeñando la función para el cual están diseñados.

La principal ventaja de implementar el mantenimiento correctivo dentro de una empresa es su bajo costo debido a que no se requiere desarrollar grandes planes de programación de actividades; pero su gran desventaja se refleja en los altos costos de reparación y adecuación de los equipos para ponerlos nuevamente en servicio, además de que hay que tener en cuenta que los demás componentes que pertenezcan directa o indirectamente a la cadena productiva afectarán los resultados esperados en cantidades de productos o en continuidad de servicio.

¹ Electrical Systems Preventive Maintenance, Richard Okrasa.

Algunas empresas que manejan alto nivel de criticidad en el proceso de producción y en la prestación de servicios se verían abocadas a asumir pérdidas debido al lucro cesante, multas e indemnizaciones por el incumplimiento si se llegaran a presentar daños en los equipos; es por esto que sería razonable tener unidades de respaldo en sitio y alternativas que despejen la condición de falla o que reestablezcan rápidamente el servicio, pero, para disponer de éstas deben realizarse estudios que evalúen el impacto del equipo sobre el proceso y que desde luego justifiquen la inversión económica.

Cuando se recurre al mantenimiento correctivo debe tenerse presente algún tipo de metodología que permita un rápido y acertado diagnóstico de la condición de falla, y una vez detectada la causa se proceda a reparar y poner nuevamente en servicio el activo, pero para que esto se cumpla es necesario contar con procedimientos de reparación ya establecidos, pues éstos implican ahorro de tiempo, recurso y por supuesto de dinero.

Un sistema de gestión de mantenimiento basado solamente en acciones correctivas generaría escenarios de baja confiabilidad e indisponibilidad de los activos, pero puede afirmarse que es muy difícil contar con un programa de mantenimiento que esté alerta ante cualquier evento que conlleve a la falla, debido a que los costos serían bastante considerables y poco atractivos para el negocio; es por esto que gran parte de los procesos productivos optan por manejar dentro de su modelo de gestión, la estrategia de mantenimiento correctivo.

2.1.2 Mantenimiento Preventivo

El mantenimiento preventivo consiste básicamente en planear inspecciones y pruebas externas e internas, “overhauls” o acondicionamientos –llevar el equipo a una condición “como nueva”–, reemplazo de partes, ajustes, calibración y reparación de componentes y equipos, en búsqueda de obtener nuevamente una condición óptima de funcionamiento aumentando la vida útil de trabajo.

Generalmente en este tipo de actividades se definen intervalos de tiempo de intervención que pueden realizarse sin estimar la condición exacta en la que se encuentra el equipo.

El mantenimiento preventivo proyecta inspecciones periódicas a intervalos predefinidos de tareas basadas en el tiempo, horas o ciclos de operación, en un intento de reducir las fallas de los equipos durante el período de vida útil. Dependiendo de la frecuencia establecida, el mantenimiento preventivo puede resultar en un incremento significativo de inspecciones y pruebas de rutina, sin embargo, esto debe estar sujeto a modificaciones de los intervalos de tiempo, debido a que los componentes del equipo se relacionan con patrones de desgaste definidos por la edad para determinadas condiciones de operación en entornos medioambientales establecidos.¹

Por lo tanto, el mantenimiento sincronizado puede frecuentemente resultar una práctica innecesaria que conlleva a costos excesivos cuando es el único modelo de gestión de mantenimiento practicado por la empresa. Por otra parte, el programa de mantenimiento preventivo puede asegurar una continuidad en la operación y con esto disminuir daños e interrupciones no planeados. Pueden programarse cierres o salidas de servicio en períodos de inactividad o de baja demanda, trayendo como resultado menor gasto a causa de multas y penalizaciones por indisponibilidad en la prestación de servicios.

2.1.3 Mantenimiento Predictivo

Las actividades de mantenimiento predictivo implican el monitoreo y diagnóstico continuo, necesario para pronosticar la degradación de algún componente de modo que puedan planearse el mantenimiento antes de que las estructuras, sistemas y componentes fallen. No todas las condiciones y modos de falla de las

¹ Reliability Centered Maintenance Guide for Facilities and Collateral Equipment, NASA.

estructuras, sistemas y componentes pueden ser supervisados, por lo tanto, el mantenimiento predictivo debe aplicarse de manera selectiva. El mantenimiento predictivo es preferible debido a que las inspecciones internas y los acondicionamientos generan costos elevados.¹

El análisis de tendencia es una de las grandes herramientas con las que cuenta este tipo de mantenimiento y gracias a los resultados de dichos estudios se predicen condiciones de posible falla; además, otra ventaja es que muchas de las metodologías se desarrollan con el equipo en operación –“on line”–, y esto no implica acarrear con los costos asociados a una parada no programada; pero la gran desventaja se debe a que generalmente los equipos y el conocimiento necesario para realizar un buen diagnóstico demanda una considerable inversión económica que sólo algunas empresas estarían dispuestas a asumir –por esta razón es que existen en el mercado compañías especializadas que cuentan con las herramientas adecuadas y se encargan de prestar este tipo de servicio.

Debido a la necesidad de mantener los equipos operando continuamente y óptimas condiciones, ésta alternativa de mantenimiento es bastante atractiva en industrias de alto impacto económico, y es por esto, que la gran mayoría se encuentran comprometidas con los avances y desarrollos que se realicen en las diversas técnicas del mantenimiento predictivo.

2.1.4 Mantenimiento Proactivo

El mantenimiento proactivo esta descrito a través de los esfuerzos necesarios para la identificación, monitoreo y control de fallas futuras haciendo énfasis en la comprensión y eliminación de la causa de las fallas.¹

¹ Guideline to good practices for types of maintenance activities at DOE nuclear facilities, DOE-Std-1052-93.

Las actividades de mantenimiento proactivo incluyen mejoras en las especificaciones del programa de gestión, por medio de la incorporación de lecciones aprendidas que aseguran la mantenibilidad y soportabilidad del modelo, de los avances en la reparación que eliminan las causas de fallas recurrentes, y de la interpretación del análisis de causa raíz que muestran porque el sistema en servicio presenta fallas.

El mantenimiento proactivo también se conoce con el nombre de mantenimiento correctivo planificado, porque muchas de las acciones se basan en dictámenes ofrecidos por técnicas preventivas y predictivas que conllevan a que el mantenimiento reactivo pueda planearse y desde luego en algunos casos puedan evitarse que se presenten fallas funcionales que acarrean altos costos por paradas de planta no programadas.

2.2 Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad

El Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM²) es el proceso que se emplea para determinar la actividad de mantenimiento más eficaz basada en los criterios de confiabilidad. En él se identifican acciones que al ser tomadas, reducen la probabilidad de falla manteniendo el menor costo posible. También busca la mezcla óptima entre las acciones basadas en la condición, las acciones basadas en el tiempo, las que dependen de la oportunidad y las que se encuentran con la aparición de la falla.³

El RCM es un proceso continuo que recoge datos de la operación de los sistemas involucrados y los emplea para contribuir con el mejoramiento del programa y en las actividades del mantenimiento futuro. Por poseer varias estrategias, la hacen

¹ Guideline to good practices for types of maintenance activities at DOE nuclear facilities, DOE-Std-1052-93.

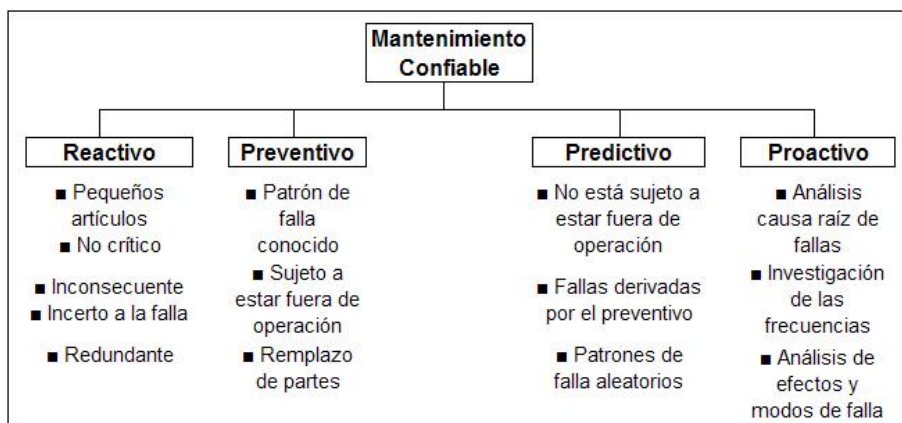
² RCM: "Reliability Centered Maintenance".

³ Reliability Centered Maintenance Guide for Facilities and Collateral Equipment, NASA.

ver como una metodología bastante flexible, complementaria y atractiva para cualquier tipo de actividad económica.¹

Las estrategias de mantenimiento, en lugar de ser aplicadas independientemente, deben integrarse para aprovechar las fuerzas respectivas de cada una y con esto lograr el perfeccionamiento de los procesos de administración, operación y mantenimiento de los activos de una empresa, mientras se minimizan los costos del ciclo de vida de los equipos.

Figura 11. Componentes del programa RCM



Fuente: Autor del proyecto.²

El objetivo del RCM es proporcionar que el ciclo productivo o la continuidad de servicio declarada por una empresa, se cumpla bajo los criterios de la confiabilidad y disponibilidad al costo más bajo. El RCM requiere que las decisiones que se tomen se basen en requerimientos de mantenimiento soportados por sólidas justificaciones técnicas y económicas. Como cualquier filosofía, existen muchos caminos o procesos que conducen al cumplimiento de la meta propuesta, y esto es especialmente cierto para el RCM donde las consecuencias de las fallas pueden variar dramáticamente de un caso a otro.³

¹ Reliability Centered Maintenance Guide for Facilities and Collateral Equipment, NASA.

² Basado en la referencia: Reliability Centered Maintenance Guide for Facilities and Collateral Equipment, NASA.

³ Reliability Centered Maintenance, F. Stanley Nowlan and Howard F.

2.2.1 Metas del programa RCM

Las metas del programa RCM se basan en la identificación de los modos de fallas y sus consecuencias para cada sistema y subsistema, además se apoya en la determinación del costo efectivo más apropiado a la técnica de mantenimiento, minimizando el riesgo y el impacto de la falla. Todo esto permite que la funcionabilidad del sistema se haga de la manera más conveniente y económica posible. Dentro de los objetivos fundamentales del plan pueden mencionarse los siguientes:¹

- Asegurar la elaboración de los niveles inherentes de confiabilidad y seguridad para los equipos.
- Restaurar el equipo a estos niveles inherentes cuando se presente deterioro.
- Obtener la información necesaria para el mejoramiento del plan cuando su confiabilidad inherente demuestre ser inadecuada.
- Conseguir estos objetivos a un costo total mínimo, incluyendo los costos de mantenimiento y el debido a consecuencias económicas de fallas funcionales.

2.2.2 Falla

La falla es la suspensión del correcto funcionamiento o desempeño de un proceso productivo o prestación de servicio. El RCM examina fallas a varios niveles como son: sistema, subsistema, componentes e incluso algunas veces a nivel de partes.¹ Lo que se propone la organización del mantenimiento es proporcionar el adecuado desempeño requerido por el sistema a un bajo costo, esto significa que la intervención debe basarse en una clara comprensión de la falla para cada uno de los niveles del sistema.

¹ Reliability Centered Maintenance, F. Stanley Nowlan and Howard F.

Los componentes del sistema pueden degradarse o inclusive fallar y todavía no causar que el sistema falle pero recíprocamente puede ocurrir que varios componentes degradados se combinen para causar que el sistema presente una falla aunque ningún componente individual se encuentre en condición de falla.²

2.2.3 Función y Falla funcional

La función de un sistema o subsistema se define como la expectativa de desempeño que debe alcanzarse para cumplir un objetivo propuesto. La función se compone de varios elementos dentro de los cuales se encuentran las propiedades físicas, el rendimiento en la operación, y los requerimientos de tiempo como son la operación continua y la disponibilidad requerida.

Las fallas funcionales representan el estado en que un sistema o subsistema se encuentra cuando no reúne los requisitos funcionales para el cual está diseñado.³ Un sistema o subsistema que está operando en un estado de degradación pero no impacta los requerimientos operacionales del negocio, puede afirmarse que no ha experimentado una falla funcional. Es importante establecer las funciones para cada sistema o subsistema perteneciente a la planta dentro de un contexto operacional dado, porque de esta forma quedan claramente definidas las fallas funcionales; por esto es fundamental que el personal a cargo de la planta conozca muy de cerca los procesos y equipos involucrados en el negocio.

2.2.4 Modos de falla

Los modos de falla se definen como las fallas que se presentan en los equipos y sus componentes que conllevan a que se genere una falla funcional del sistema o

¹ Reliability Centered Maintenance Guide for Facilities and Collateral Equipment, NASA.

² Ibid.

³ Ibid.

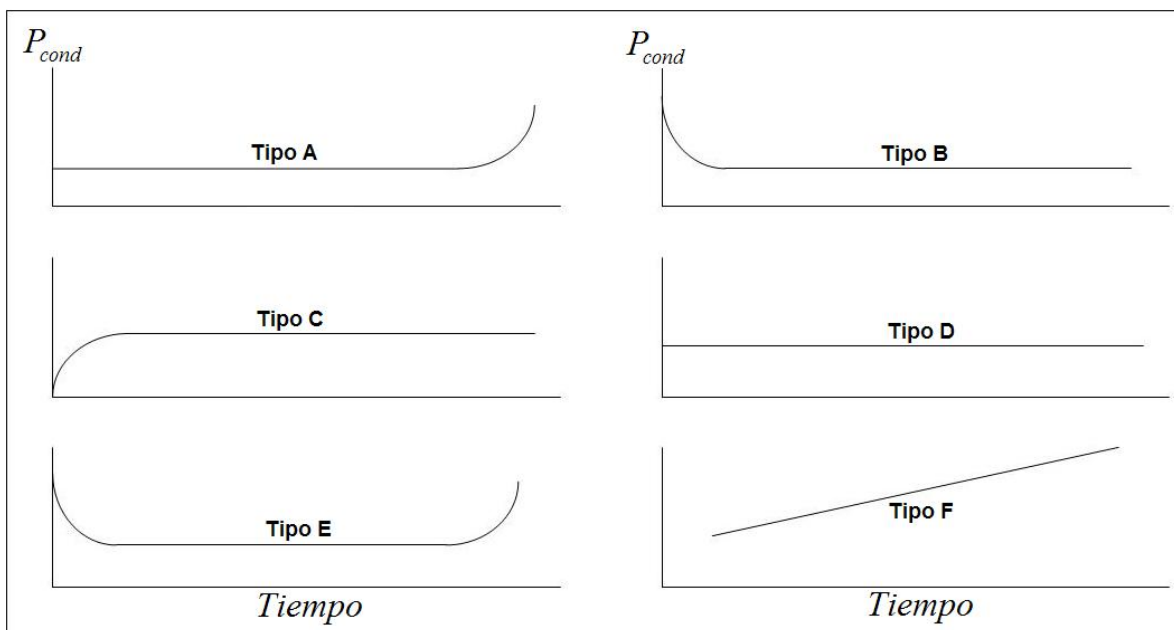
subsistema¹. Los modos de falla dominantes son aquellos que son responsables de la mayor cantidad de fallas funcionales en sistemas y subsistemas.

No todos los modos o causas de falla justifican que se implemente un programa de mantenimiento preventivo y predictivo para combatirlos, porque parte de ellos presentan pocas probabilidades de que ocurran o su efecto es inconsecuente.

2.2.5 Características de la falla

La probabilidad de falla (P_{cond}) se grafica con respecto al tiempo para establecer las curvas características de comportamiento de la falla. A continuación se describen cada uno de los tipos de fallas teniendo en cuenta la clasificación realizada por “Reliability Centered Maintenance” de F. Stanley Nowlan y Howard F.

Figura 12. Tipos de falla



Fuente: Autor del proyecto.

¹ Guía para la elaboración de los estudios MCC, ISA –Interconexión Eléctrica S.A.

- Tipo A: Primero se presenta una etapa donde la probabilidad de falla permanece constante o aumenta de una forma gradual, luego se muestra una región donde la característica se pronuncia hasta alcanzar la etapa de salida de uso. Se aconseja que se maneje un límite de edad para el equipo. (Es típico en máquinas).
- Tipo B: La primera etapa se le conoce como la de mortalidad infantil, seguida por una región que presenta una probabilidad de falla constante o lenta. (Es típico en equipos electrónicos).
- Tipo C: La probabilidad de falla es baja cuando el dispositivo es nuevo o justo después de una reparación, seguida de un rápido incremento a un nivel relativamente constante.
- Tipo D: Probabilidad de falla relativamente constante para cada una de las edades del dispositivo.
- Tipo E: Se le conoce como la curva de la bañera por la forma que la característica que describe. En un comienzo se presenta una etapa conocida como mortalidad infantil seguida por una región de probabilidad de falla constante o gradual y luego se alcanza una fase pronunciada hacia la salida de uso. Se aconseja que se maneje un límite de edad para el equipo, pero en lo posible debe asegurarse que un gran número de unidades sobreviva a la edad donde empieza a presentarse la salida de uso.
- Tipo F: La probabilidad de falla se incrementa gradualmente, pero no es identificable plenamente la edad de salida de uso. Normalmente el límite de edad no puede aplicarse para éste tipo de falla. (Es típico en máquinas con turbina).

2.2.6 Análisis de efectos y modos de falla

El análisis de efectos y modos de falla es un elemento que se emplea dentro del sistema de gestión del mantenimiento centrado en la confiabilidad, y particularmente en la estrategia de mantenimiento proactivo. Este análisis se le aplica a los sistemas y subsistemas que componen la planta y se utiliza para determinar que partes son las que fallan, establecer el por qué de la ocurrencia

éstas fallas, y reconocer cuál es su efecto o consecuencia dentro de la totalidad del sistema.

Generalmente los resultados que arroja dicho estudio se clasifican en categorías que son establecidas de acuerdo al grado de criticidad o severidad de la falla y en base en la probabilidad de ocurrencia de la misma, de esta forma se logra alcanzar un nivel de cuantificación del impacto de la falla sobre el sistema.

2.2.7 Análisis de causa raíz de la falla

También es una técnica que se emplea en la estrategia de mantenimiento proactivo y que permite estudiar más detalladamente las causas de las fallas desde un punto de vista “post-operativo”, donde lo más importante es recoger y analizar todos los datos que puedan servir para establecer qué es lo que verdaderamente provoca la falla y como poder evitarla o combatirla.

El análisis de causa raíz es el proceso que se encarga de explorar en gran detalle, todas las posibles causas relacionadas con la falla de un sistema o equipo. Las causas de las fallas se agrupan en categorías generales para posteriormente realizar un análisis adicional más exhaustivo; éstas generalmente corresponden a características que involucran la operación y el mantenimiento de la máquina, el personal a cargo, los métodos y procedimientos, los materiales, las políticas, el medio ambiente y los errores presentes en los sistemas de medición.¹

2.2.8 Definiciones y conceptos asociados al programa RCM

En esta sección se dan algunas definiciones que se manejan muy frecuentemente en el argot de las empresas que han implementado dentro de sus sistemas de gestión, el mantenimiento centrado en la confiabilidad.

¹ Guía para la elaboración de los estudios MCC, ISA –Interconexión Eléctrica S.A.

- **Disponibilidad**

Se le conoce de manera común, al tiempo en que una máquina o sistema está disponible para el uso en alguna actividad. Matemáticamente se define el cálculo de la disponibilidad como la relación que existe entre el tiempo de operación real de la máquina o sistema y el tiempo de operación planeado, dentro de una ventana de tiempo establecida.

Análogamente se maneja el término de indisponibilidad del activo que viene a ser la fracción de tiempo en el que el equipo o sistema no puede operar, y se define matemáticamente como la relación entre el tiempo medio de reparación del equipo contado a partir del momento de la falla y el tiempo medio entre fallas.

- **Mantenibilidad**

La capacidad de conservar o restaurar el funcionamiento dentro de un periodo específico de tiempo, cuando son proporcionados el entrenamiento, las herramientas y los procedimientos necesarios.¹ Dentro de los factores que influyen en la mantenibilidad se incluyen: maquinaria y acceso a los sistemas, visibilidad, simplicidad, facilidad para ejecutar pruebas y monitoreo, entrenamiento, herramientas especiales, y capacidad de mano de obra calificada.

- **Confiabilidad**

La confiabilidad se define como la duración o probabilidad de que un equipo o sistema funcione libre de falla en un intervalo de tiempo específico bajo condiciones establecidas.¹ Para realizar la valoración de la confiabilidad en muchos casos es necesario establecer rangos de cuantificación que determinen el

¹ Reliability Centered Maintenance Guide for Facilities and Collateral Equipment, NASA.

nivel o grado en que se encuentra el equipo de acuerdo con la edad del ciclo de vida productivo.

- **Tasa de falla**

La tasa de falla se conoce como la relación que existe entre el número de fallas de un equipo y el intervalo de tiempo establecido. La tasa de falla cambiará con el tiempo y puede llegar a ser mayor que uno pero nunca podrá ser menor que cero.¹ También puede utilizarse la siguiente definición donde se involucra el concepto de confiabilidad, la tasa de falla se le conoce como la relación que existe entre el número de equipos de una muestra que fallarán en un intervalo de tiempo con respecto al total de equipos que aún no han fallado.

- **Mantenimiento basado en la condición**

Es el mantenimiento que aplica acciones sobre los equipos sólo cuando la condición lo amerite. Este reemplaza las tareas planeadas con tiempos arbitrarios o las que emplean intervalos o frecuencias. Esta técnica involucra la aplicación de nuevas tecnologías necesarias para la detección y evaluación de la condición real en la que se encuentra la unidad.

- **Mantenimiento basado en el tiempo**

Son las actividades de mantenimiento donde la variable fundamental que se maneja es el tiempo, pero generalmente sólo se utiliza donde se ha comprobado que la técnica aplique de una forma conveniente, es decir, sin llegar justo a la etapa de degradación donde puedan verse alteradas otras partes del sistema y cuando se subvaloren los tiempos de reemplazo que implican costos adicionales.

¹ Guía para la elaboración de los estudios MCC, ISA –Interconexión Eléctrica S.A.

Cuando se hablan de frecuencias de tiempo no sólo se refieren a la maniobras invasivas sobre la máquina sino también a las que se recurren cuando se necesitan emplear técnicas para el monitoreo y pruebas donde es indispensable reevaluar los intervalos de tiempo a medida que se reconozcan los aspectos fundamentales que afecten dicha elección.

- **Mantenimiento hasta que se presente la falla**

Esta propuesta de mantenimiento implica que después de la instalación del equipo ninguna acción es tomada para prevenir la falla. Los sistemas que son candidatos para aplicar esta técnica son los que usualmente son de bajo costo de reemplazo, fácil y económica reparación y, por supuesto, los que no impacten de forma crítica en el proceso productivo de la planta.

2.2.9 Beneficios alcanzados con el programa RCM

- **Seguridad**

Gran parte de las empresas que poseen en sus tareas el manejo de material peligroso o sus procesos involucran maniobras de alto riesgo, que puedan resultar perjudiciales para la integridad del personal, el ambiente y los equipos; resulta de suma importancia que dentro de sus políticas de calidad estén presentes los alcances que tiene la seguridad para el funcionamiento adecuado del negocio.

Es por esto que gran parte de los planes del RCM están soportados bajo los lineamientos de calidad impuestos para el proceso y por eso se hace conveniente que se elabore un detenido programa que asegure contar con los más altos niveles de seguridad tanto del recurso humano como del material.

¹ Reliability Centered Maintenance Guide for Facilities and Collateral Equipment, NASA.

- **Costos**

Para implementar el RCM dentro de una empresa se requiere una fuerte inversión económica inicial, debido a que es necesario obtener herramientas tecnológicas, entrenar y capacitar al personal involucrado, y documentar la condición en que se encuentran los equipos, y debido al impacto del mantenimiento sobre la operación dicha inversión puede ser justificada.¹

Un RCM que requiera contar con resultados a corto plazo implica aumentar los costos de mantenimiento, pero éste incremento es relativamente transitorio en parte ya que los costos de reparación decrecen conforme la prevención de las fallas a causa de que las tareas de mantenimiento preventivo son reemplazadas por las de monitoreo de condición; y el efecto es una reducción de ambas, la reparación y el costo de mantenimiento. A menudo también se componen de los ahorros en energía realizados con el uso de las técnicas predictivas y demás actividades que generen valor agregado al costo total asociado al mantenimiento y a la reparación de equipos.

- **Confiabilidad**

El RCM se enfoca en gran parte en el mejoramiento de la confiabilidad del equipo, principalmente con la retroalimentación de la experiencia en mantenimiento y los datos de condición del equipo entregados por los planeadores, diseñadores, gerentes, ejecutores y fabricantes. Esta información es un instrumento para actualizar las especificaciones del equipo en búsqueda de incrementar la confiabilidad, por lo tanto esto conduce a que se presenten menos fallas y por consiguiente, una mayor disponibilidad para cumplir con las disposiciones de la operación a un bajo costo debido al mantenimiento.

¹ Guía para la elaboración de los estudios MCC, ISA –Interconexión Eléctrica S.A.

- **Planeación**

La capacidad de implementar un programa de monitoreo por condición para pronosticar mantenimiento proporciona el tiempo para la planeación, reemplazo de partes, y propicia las condiciones de operación y medioambientales antes que el mantenimiento se realice. Las técnicas predictivas reducen el mantenimiento innecesario llevado a cabo por los programas de mantenimiento de tiempo programado, la aplicación de éstas actividades conllevan a que se obtenga la mínima seguridad en los intervalos entre tareas de mantenimiento.

La principal ventaja del RCM es que obtiene el máximo uso del equipo. Con RCM, el reemplazo de equipos se basa en la condición del mismo, y no en el tiempo del calendario. Esta condición se basa en la cercanía de ejecutar las labores de mantenimiento cuando sean necesarias para que de este modo se extienda la vida de operación de la planta y se ahorre dinero debido a que las acciones son tomadas en el momento adecuado.

- **Eficiencia**

La seguridad es la preocupación principal del RCM. El segundo es el costo de efectividad que trata de valorar la eficiencia técnico-económica, éste toma en consideración la prioridad o misión crítica –objetivo principal del negocio– y entonces intenta igualar el nivel de costo apropiado con dicha prioridad.¹ La flexibilidad del RCM asegura que el tipo adecuado de mantenimiento se realice cuando este lo necesite, pero si no es efectivo con respecto al costo, este debe identificarse y no debe ejecutarse.

¹ Reliability Centered Maintenance Guide for Facilities and Collateral Equipment, NASA.

3 MANTENIMIENTO CORRECTIVO DE MOTORES DE INDUCCIÓN

Cuando se aplica esta técnica de mantenimiento, las tareas de reparación de equipos o reemplazos de partes ocurren solamente cuando el deterioro en la condición de la unidad causa una falla funcional. En este tipo de mantenimiento se asume que es igualmente probable que la falla se presente en cualquier parte o componente del sistema. Si se maneja esta suposición al pie de la letra, no sería posible identificar un grupo específico de partes indispensables para la reparación, es por esto que es muy importante establecer los modos de falla y la probabilidad de ocurrencia para determinar cuales son los repuestos con los que deben contarse en el inventario.

El mantenimiento reactivo puede emplearse de forma eficaz cuando se ha tomado una decisión consciente basada en los resultados de un estudio RCM que compare el riesgo y costo de la falla, con el costo del mantenimiento requerido para atenuar éste y las consecuencias económicas que trae la misma. En algunos casos es recomendable esperar a que se presente la falla pero teniendo muy claras todas acciones necesarias para el posterior despeje, para eso es importante integrar las políticas de “stock” de materiales y de “stand-by” de equipos que maneje la empresa con las estrategias ligadas a la operación y al mantenimiento.

3.1 Criterios para el mantenimiento reactivo

La siguiente clasificación sugiere una serie de criterios que pueden emplearse para determinar cual es la prioridad en que se encuentra el estado del equipo y desde luego con esto poder establecer el momento óptimo para realizar la reparación, el reemplazo de partes o llegado el caso la totalidad del equipo, basadas en una clara estrategia de mantenimiento correctivo.

Tabla 1. Criterios para el mantenimiento reactivo

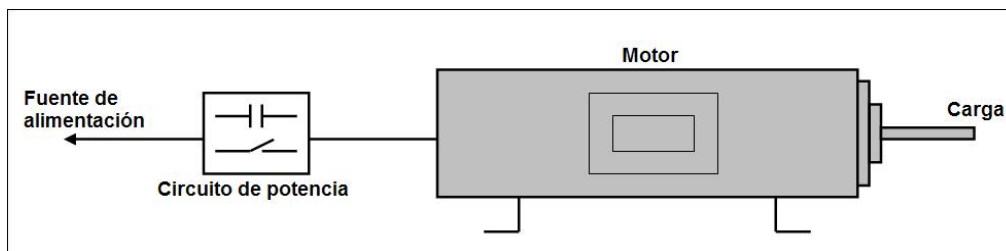
Prioridad		Criterio basado en consecuencias del equipo / falla del sistema
Categoría	Descripción	
1	Emergencia	<ul style="list-style-type: none"> ■ Amenaza a la propiedad o integridad de la vida ■ Serio impacto inmediato en la misión
2	Urgente	<ul style="list-style-type: none"> ■ Amenaza de la operación continua de la planta ■ Serio impacto inminente en la misión
3	Prioridad	<ul style="list-style-type: none"> ■ Degrada la calidad del apoyo a la misión ■ Adverso y significativo efecto sobre el proyecto
4	Rutina	<ul style="list-style-type: none"> ■ Disponibilidad redundante ■ Impacto insignificante en la misión
5	Discreto	<ul style="list-style-type: none"> ■ Impacto despreciable en la misión ■ Disponibilidad de recursos
6	Diferido	<ul style="list-style-type: none"> ■ Impacto despreciable en la misión ■ Indisponibilidad de recursos

Fuente: Reliability Centered Maintenance Guide for Facilities and Collateral Equipment, NASA.

3.2 Zona de fallas en motores de inducción

Para determinar las posibles causas que afectan a los motores de inducción es necesario conocer las zonas donde es posible que puedan presentarse las fallas; para ello se ha propuesto dividirlos en dos, en una zona externa y otra interna.

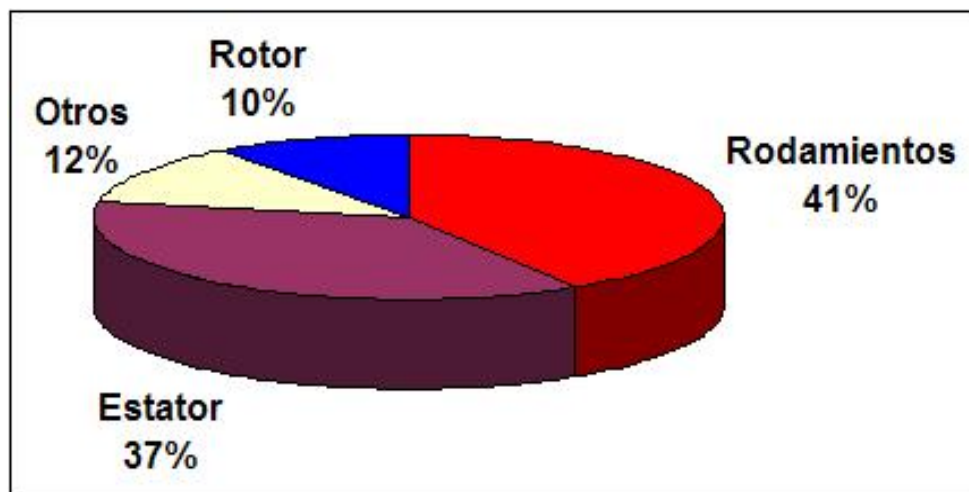
Figura 13. Zonas de fallas en los motores de inducción



Fuente: Autor del proyecto.

En las siguiente figura y tabla se muestran los porcentajes típicos obtenidos para las zonas de fallas en los motores de inducción según el estudio de la EPRI¹ y la General Electric realizado en 1985, y el desempeñado por la IEEE¹ a mediados de la década de los ochenta.

Figura 14. Porcentaje de fallas según la zona de ocurrencia



Fuente: Autor del proyecto.

Tabla 2. Comparativo de porcentajes de zonas de ocurrencia de fallas

Falla	IEEE	EPRI
Rodamientos	44 %	41 %
Estator	26 %	37 %
Rotor	8 %	10 %
Otros	22 %	12 %

Fuente: Autor del proyecto.

3.2.1 Externa

Es la zona que se compone de la fuente de alimentación, el circuito de potencia y la carga mecánica. En pocas palabras son todos los elementos y dispositivos que se encuentran fuera del motor considerado como un subsistema, pero que son necesarios e indispensables para alcanzar un correcto funcionamiento.

¹ EPRI: Electric Power Research Institute.

- **Circuito de potencia**

Generalmente se establece desde el Centro de Control de Motores hasta la caja de bornes de la unidad, e involucra a todos los conductores con sus conectores y la casilla donde se encuentran el sistema de protección y de mando del motor.

- **Calidad de energía**

La calidad de energía ha sido ignorada en muchos casos por el personal de mantenimiento y sin duda es una zona de falla con mucha influencia en la vida de un motor.¹ En la calidad de energía se tienen en cuenta los fenómenos y perturbaciones que afectan el adecuado rendimiento de la máquina y que se atribuyen principalmente a la fuente de alimentación y los dispositivos que están conectados al circuito de potencia.

- **Carga mecánica**

Esta zona se compone principalmente de las condiciones de carga mecánica impuesta por el proceso productivo y a las cuales se somete el motor de inducción. En algunos casos es bastante conveniente que se conozcan a fondo el comportamiento de las cargas, entre ellas pueden nombrarse: las bombas hidráulicas, compresores y ventiladores.

3.2.2 Interna

Esta zona se conforma propiamente de las partes constitutivas del motor de inducción, y se dividen en:

¹ IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

- **Estator**

En un estator es importante diagnosticar los devanados, el aislamiento entre espiras, las juntas de soldadura entre los grupos de bobina y las laminaciones que conforman el núcleo magnético.

- **Rotor**

Cuando se refiere a la condición de un rotor deben revisarse las barras, las laminaciones del núcleo y los anillos de cortocircuito que componen la jaula. En esta zona también se incluyen el eje y los rodamientos.

- **Entrehierro**

El entrehierro es la zona que existe entre el estator y el rotor de la máquina, esta franja debe ser totalmente regular a través de los 360° que conforman la periferia alrededor del eje.

3.3 Causas de falla común en motores

Generalmente las fallas en los motores pueden clasificarse dependiendo del fenómeno que las produce, ellos son típicamente de origen mecánico, térmico y eléctrico o una combinación de éstos. Los motores no fallan solamente debido a la edad o a las horas de operación, además, los esfuerzos por calentamientos, las anomalías en la fuente de energía, la humedad, la contaminación, la lubricación incorrecta, y las inusuales cargas mecánicas, junto con la degradación de los componentes son causas que acrecientan la probabilidad de falla.

¹ Análisis de la zona de fallas de motores eléctricos, Juan Hidalgo.

3.3.1 Calentamiento

El aislamiento eléctrico es uno de los que más sufre con los calentamientos excesivos de la máquina, además puede afirmarse que por cada 10 °C de incremento en la temperatura la vida útil del aislamiento cae dramáticamente a la mitad.¹ La temperatura excesiva también causa separación de grasas y daños en el aceite que puede generar fallas en el rodamiento. Entre las causas principales de sobrecalentamiento pueden nombrarse:

- Sobrecarga
- Arranques frecuentes
- Alta temperatura en el ambiente
- Baja tensión y desbalances
- Operación en altos niveles sobre el nivel del mar
- Ventilación inadecuada

3.3.2 Anomalías en la fuente de energía

La fuente de energía ideal es una onda senoidal perfecta en cada fase del motor para el nivel de tensión y frecuencia nominal, pero raramente puede lograrse esto debido en gran parte a los siguientes problemas:

- **Armónicos**

La presencia de altos contenidos de armónicos causa sobrecalentamientos, distorsión del voltaje en la instalación, corrientes de neutro excesivas, altos valores de voltaje neutro a tierra, bajo factor de potencia y un descenso en la eficiencia del sistema.¹

¹ Guía para pruebas de diagnóstico de aislamiento, Megger.

- **Trabajar fuera de los límites nominales de tensión**

En los límites recomendados por NEMA², no generan daños considerables, pero si pueden reducir la eficiencia y el factor de potencia del motor.

- **Subtensiones**

Las caídas de tensión provocan un aumento en la corriente, en la temperatura y una reducción en la eficiencia de los motores totalmente cargados. Este fenómeno es relativamente poco significativo cuando los motores se encuentran con baja carga de operación.³

- **Desbalances de tensión**

Cuando los voltajes que se aplican a un motor no están equilibrados, éstos desarrollan corrientes desbalanceadas⁴ en los devanados del estator, que dependiendo de la magnitud de sus componentes de secuencia negativa y cero reducirían notablemente el torque y aumentarían el consumo de corriente del motor respectivamente. También se producen dos efectos importantes como son el aumento de la temperatura y de los niveles de vibración en la máquina.

3.3.3 Humedad

La humedad se convierte en un problema cuando el motor se encuentra desenergizado por un largo tiempo y la temperatura cae cerca del punto de rocío⁵. La humedad debilita la rigidez dieléctrica del barniz y los otros materiales

¹ Análisis de la zona de fallas de motores eléctricos, Juan Hidalgo.

² NEMA propone como límite que no se sobrepase el 10% del valor nominal de tensión.

³ *Ibíd.*

⁴ NEMA recomienda operar el motor con un desbalance de voltaje menor al 5%.

⁵ El punto de rocío se define como la temperatura a la cual el aire queda saturado con vapor de agua. El problema que se deriva es cuando se presenta el fenómeno de condensación.

aislantes, además contribuye con la corrosión de los rodamientos y los demás componentes mecánicos.

3.3.4 Contaminación

La contaminación no puede descartarse en motores con encerramiento total o incluso con los que cuentan con cubiertas a prueba de explosión.¹ Principalmente la contaminación destruye los motores por tres métodos:

- Abrasión
- Corrosión
- Sobrecalentamiento

Algunas partículas en el aire pueden ser muy abrasivas y estas pueden atacar las superficies aislantes protectoras que cubren los devanados. El fenómeno de la corrosión puede manifestarse de una manera notable cuando en el ambiente que rodea al motor se encuentran sustancias corrosivas como las sales y componentes químicos que junto con la humedad agreden –en especial el aislamiento eléctrico– los materiales del motor. La fuerte acumulación de contaminantes típicamente obstruye los conductos internos de ventilación en motores abiertos o externamente en los motores cerrados, provocando por lo general un sobrecalentamiento excesivo durante la operación.

3.3.5 Lubricación inapropiada

Desafortunadamente, existen varias formas de conseguir una equivocada lubricación. Una puede ser la cantidad de lubricante, pues tanto las altas como las bajas concentraciones no son recomendables para el buen funcionamiento del rodamiento, otra es, cuando en la carga de grasa se introducen contaminantes a

¹ Motor Repair Tech Brief, Washington State University.

los rodamientos debido al manejo inadecuado del instrumento de inyección y a la falta de protección de la suciedad en la punta del inyector.

Además de las anteriores hay que mencionar que la mezcla de grasas con diferentes bases puede causar que los componentes se separen por la incompatibilidad de las mismas y terminen sacando de operación la unidad.¹

3.3.6 Cargas mecánicas inusuales

Una variedad de condiciones mecánicas pueden generar un esfuerzo anormal en los rodamientos que conlleven a una falla temprana, o a que se presente una deformación de la carcasa del motor causando asimetrías en el entrehierro, que a su vez pueden terminar en problemas de vibración y en fallas de los rodamientos. Otra de las implicaciones que se generan por el manejo de sobrecargas es el aumento de la corriente y la temperatura, afectando de forma considerable el aislamiento eléctrico de los bobinados.

3.3.7 Puntos de alta resistencia eléctrica

Generalmente la principal falla en la zona del circuito de potencia es la que se presenta debido a los falsos contactos o también conocidas como conexiones de alta resistencia eléctrica que se oponen al paso normal de la corriente. Típicamente las conexiones de alta resistencia son causadas por:

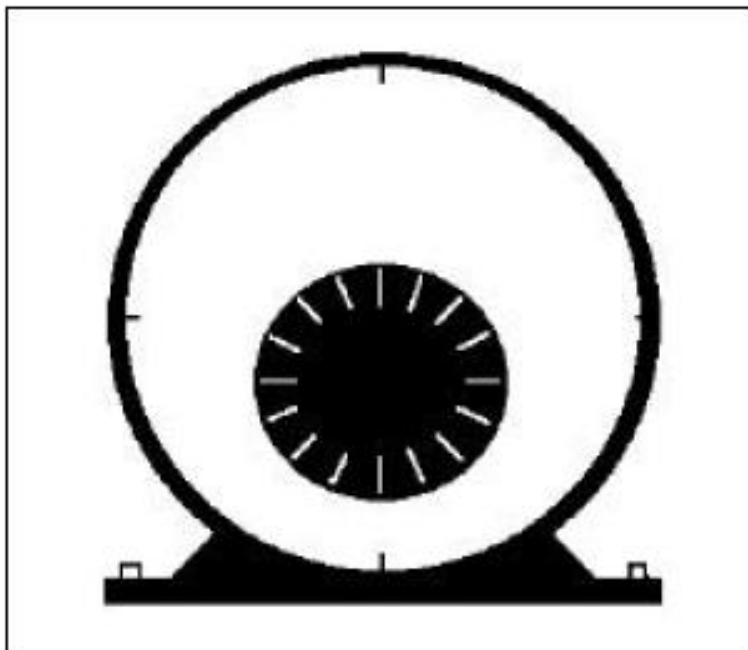
- Terminales corroídos
- Conductores sueltos
- Cables del conductor rotos
- Conexiones entre aluminio–cobre
- Diferentes tamaños de conductores

¹ Motor Repair Tech Brief, Washington State University.

3.3.8 Excentricidad

Cuando el entrehierro de la máquina no está bien distribuido alrededor de los 360° del eje se producen campos magnéticos desiguales, éstos con el tiempo conllevaría a que se presentara una falla en el aislamiento por fricción entre el estator y el rotor, aunque la principal parte que asumiría los daños serían los rodamientos.¹ A este problema se le conoce como excentricidad, existen básicamente dos tipos, la estática en la cual el rotor está descentrado pero fijo en un lugar, generalmente este tipo de problema es causado por un inadecuado alineamiento o porque la carcasa se encuentra torcida.

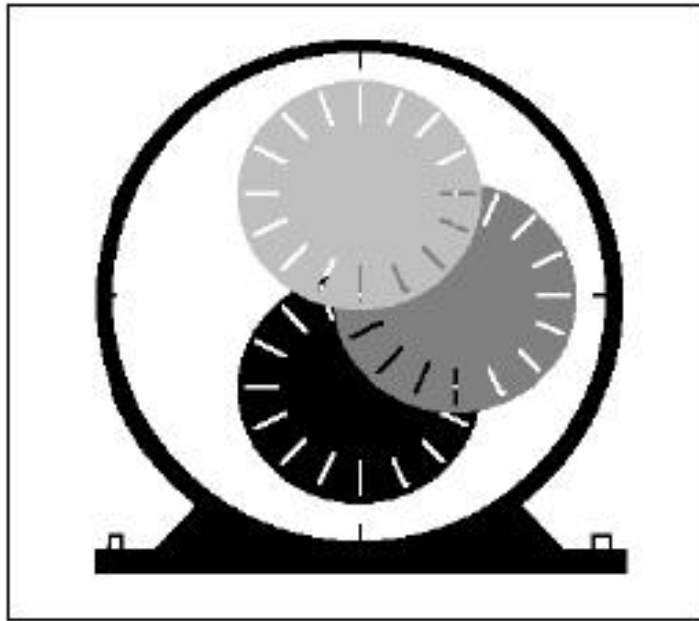
Figura 15. Excentricidad estática



Fuente: Análisis de la zona de fallas de motores eléctricos, Juan Hidalgo.

El otro tipo de excentricidad es la dinámica, y como resultado el rotor se desbalancea dentro del estator. La excentricidad dinámica se produce generalmente por una deflexión o pandeo en el eje.

Figura 16. Excentricidad dinámica



Fuente: Análisis de la zona de fallas de motores eléctricos, Juan Hidalgo.

3.4 Reparación mecánica

Esta parte del documento se compone de las acciones recomendadas que deben tenerse en cuenta al momento de realizar algún tipo de reparación mecánica en el motor de inducción, para la obtención de esta sección se tuvo como principales referencias las siguientes fuentes: EASA Standard AR100-2001 “Recommended practice for the repair of rotating electrical apparatus”; “AC Motor repair specification” de NWIBRT, y la IEEE Std. 1068-1996 “IEEE Recommended Practice for the Repair and Rewinding of Motors for Petroleum and Chemical Industry”.

3.4.1 Eje

En cuanto a los ejes la búsqueda se centra en las anomalías que se presentan debido a su uso, en especial indicios de desgaste irregular provocado por

¹ Análisis de la zona de fallas de motores eléctricos, Juan Hidalgo.

operación inadecuada o fallas repentinas –en el cien por ciento de los casos esta pieza de la máquina no se diseña con el propósito de sufrir daños por desgaste–; también se verifica la existencia de grietas, puntos de corrosión, rayas y señales de deflexión o pandeo.¹

- **Extensiones del eje**

Las extensiones del eje que comúnmente se conocen con el nombre de bujes o camisas son las piezas de la máquina que se diseña con el fin que se desgaste de manera uniforme para que así se eviten daños sobre el eje, éstas son utilizadas especialmente en rodamientos tipo chumacera. El registro sobre dichas partes debe componerse en lo posible de secciones uniformes, lisas, suaves, pulidas y concéntricas con el centro del eje, para poder emitir un juicio favorable de la condición de las mismas. Desde luego es necesaria la medición de las dimensiones para poderlas contrastar con los valores de las tablas de tolerancias permisibles expuestas por la NEMA² y la IEC¹ –una buena fuente se encuentra en la sección 2 de la EASA Std. AR100-2001.

3.4.2 Rodamientos

Los rodamientos de gran parte de los motores se conforman de dos tipos fundamentales, éstos son los que se denominan antifricción (bolas y rodillos) y los lisos (manguito, chumacera). Para cada una de las condiciones de desempeño y funcionamiento de la máquina se opta por el uno o por el otro, es así como los cojinetes antifricción no se emplean en casos donde el empuje axial sea considerable y en los que son de tipo manguito especialmente se utilizan en máquinas de gran porte.

¹ Se recomienda al lector referirse a: NEMA MG 1-1993, Sección 1, Parte 4 Parágrafo 4.05.7 y 4.07.1.

² NEMA: National Electrical Manufacturers Association.

- **Rodamientos antifricción**

Las distancias del sitio donde se alojan los rodamientos y la pista interna de los mismos deben medirse y compararse con las especificaciones que recomienda el fabricante², para que su acople sea lo más preciso posible y se encuentre dentro de las tolerancias. También conviene que en el momento de la intervención se inspeccione la condición del lubricante, la suciedad, óxido, indicios de humedad, picaduras por corrosión, decoloración térmica, daños en las bolas, rodillos o en las pistas y en los retenedores. Generalmente para este tipo se prefiere el reemplazo y no la reparación, especialmente por el costo que se deriva de esta.

- **Rodamientos lisos**

El diámetro de los cojinetes lisos debe ser uniforme para que encajen exactamente en su sitio de alojamiento, además los canales deben ser apropiados para que la distribución del lubricante sea la más adecuada, cuando éste es remanufacturado o reemplazado, en lo posible la distancia diametral debe ceñirse a los valores originales propuestos por el fabricante.

Se recomienda mantener en buen estado el “babbitt”³ y el sistema de aislamiento suministrado para bloquear el paso de corriente al rodamiento. La inspección se centrará en la búsqueda de fugas de aceite, daños en el anillo y taponamientos en el sistema de lubricación, en especial los conductos y tuberías. Otro aspecto importante consiste en comprobar el correcto funcionamiento del sistema de bombeo del lubricante.

¹ IEC: International Electrotechnical Commission.

² Como una guía se recomienda el Std. 7 de la ANSI/ABMA.

³ Nombre original de las aleaciones blancas de estaño-antimonio-cobre empleadas en cojinetes, pero el término se aplica ahora a cualquier aleación blanca para rodamientos con base de estaño o de plomo.

El aceite de los anillos debe ser exacto para que se presente libremente la rotación, además si se cuentan con retenedores, éstos se reemplazarán si es necesario dependiendo del estado en que se encuentren. Los sellos se inspeccionan en búsqueda de daños, presencia de fugas, cristalización o endurecimiento de los materiales del cual se componen, además el espacio de éstos debe corresponder a las condiciones originales del fabricante del equipo.

- **Reemplazo de los rodamientos**

Para efectuar una adecuada elección del momento para el reemplazo de los rodamientos deben tenerse presente algunas consideraciones desde el punto de vista técnico y económico, y es por esto que es importante realizar una buena inspección y diagnóstico del estado en que se encuentra el mismo para poder tomar la mejor decisión. Por eso en la mayoría de los rodamientos conviene verificar las siguientes condiciones: flujo de corriente del eje, carga que genere empuje, fatiga, fallas en la lubricación y la presencia de espacios internos que no estén de acuerdo con las especificaciones del fabricante.

3.4.3 Lubricación

Básicamente los dos elementos empleados en la lubricación de las partes móviles de los motores de inducción son la grasa y el aceite, éstos son de dos tipos, los que comúnmente se conocen como minerales y su procedencia es debida a los hidrocarburos y los sintéticos que se componen de hidrocarburos y disolventes mezclados en proporciones adecuadas dispuestas en el laboratorio.

- **Grasa**

La grasa que se encuentra en la entrada y tuberías debe removerse para evitar que se impregnen elementos contaminantes que afecten el funcionamiento de la

unidad, además las entradas de grasa deben equiparse con accesorios que faciliten el proceso de engrase.

La grasa debe ser compatible con el lubricante recomendado por el fabricante y además es importante que durante el proceso de ensamble de la máquina o cuando los rodamientos se encuentren abiertos se llenen de grasa de forma conveniente para que con esto se alargue el tiempo de vida útil del motor. En la ausencia de las instrucciones de lubricación por parte del fabricante, se recomienda que el depósito de grasa sea llenado aproximadamente con 1/3 de su capacidad.¹

- **Aceite**

El aceite debe ser compatible con el lubricante recomendado por el fabricante, además es necesario contar con medios que permitan determinar el nivel de aceite, reservorios y puntos donde se puedan adquirir muestras para los estudios y análisis de tribología.

3.4.4 Carcasa y alojamiento de los rodamientos

La carcasa y el alojamiento de los rodamientos se examinan en búsqueda de defectos, grietas, hendiduras, picaduras por corrosión, estado de la pintura, integridad de la soldadura estructural, conductos del sistema de ventilación y estado de los soportes, todas estas anomalías deben repararse y restaurarse de acuerdo a las recomendaciones del fabricante.

En la sección 2 de la EASA Std. AR100-2001 se presentan las tablas de tolerancias de las superficies de montaje, excentricidad y desviación, estas son

¹ “AC Motor repair specification” de NWIBRT.

clasificadas para cada uno de los tipos de montaje propuestos por la NEMA y la IEC.

3.4.5 Laminaciones

Las laminaciones del rotor deben encajarse adecuadamente sobre el eje, el alojamiento del rodamiento debe restaurarse si se encuentra flojo o en mal estado. El diámetro externo de las laminaciones del rotor debe ser exacto y concéntrico con los rodamientos, con esto se logran niveles que estén de acuerdo con las tolerancias empleadas en la excentricidad de la máquina.

Las laminaciones del estator deben estar fuertemente unidas entre sí y el yugo completo a la carcasa del motor. El calibre de las laminaciones del estator debe ser exacto y concéntrico con la muesca de la carcasa para poder lograr ranuras uniformes a lo largo del mismo.

Con la uniformidad y la correcta juntura de las laminaciones tanto del estator como las del rotor se evitan daños desde el punto de vista eléctrico y mecánico, que principalmente causan la concentración de flujos magnéticos excesivos, problemas de calentamiento y de vibración.

3.4.6 Balanceo

El balanceo dinámico debe realizarse para el nivel especificado por las condiciones de operación, pero en ausencia de un nivel solicitado se recomienda practicar un balanceo dinámico G2.5 (ISO 1940/1)¹, éste permite habilitar la máquina para que cumpla con los límites de vibración establecidos para un buen funcionamiento. Al momento de localizar los pesos de equilibrio, éstos no deben interferir con otros componentes de la unidad.

¹ EASA Standard AR100-2001 "Recommended practice for the repair of rotating electrical apparatus".

3.5 Reparación eléctrica

Particularmente los procesos que involucran reparación desde el punto de vista eléctrico abarcan elementos relacionados con el aislamiento, la conductividad y los dispositivos sensores empleados en el funcionamiento de la máquina. En esta sección se trata de determinar las condiciones en que se encuentran los componentes que conforman el motor por medio de inspecciones recomendadas y de comparaciones con resultados arrojados por reparaciones en unidades similares.

3.5.1 Devanados

La inspección se enfoca en la búsqueda partes quemadas o carbonizadas, cintas sueltas o resquebrajadas, bobinas que se hayan movido dentro de las ranuras, depósitos de suciedad o químicos, y daños en el aislamiento debido a partículas abrasivas. Si se ha presentado en algún sitio un arco severo con muestras de quemaduras, es conveniente inspeccionar cuidadosamente la unidad entera para tratar de hallar fragmentos o cobre fundido que pudo haber sido proyectado de la bobina fallada.

En algunos bobinados de máquinas que presentan descargas parciales se encontrarán posiblemente evidencias de un polvo blanco o gris en la superficie de las ranuras. Cuando un devanado muestra una clara evidencia de destrucción por arcos o sobrecalentamiento, es necesario observar y registrar cuidadosamente la locación y la naturaleza del daño, pues esto ayuda de manera considerable en la identificación del modo de falla.

Si todas las bobinas parecen igualmente sobrecalentadas, las potenciales fallas pueden deberse a una pésima ventilación, a un bajo voltaje suministrado, o a sobrecargas prolongadas. Si los bobinados dentro de una fase están en gran parte

sin daño, las causas probables son solo debido a la operación incorrecta de la fase o a serios desbalances de voltaje, pero si solo ciertas bobinas adyacentes a los conductores provenientes de las borneras poseen daños, especialmente con muestras de pequeños calentamientos, la posible causa se debe a una sobretensión transitoria en el circuito de alimentación.¹

Figura 17. Muestras de quemaduras en los cabezales del devanado de un estator



Fuente: On-line and Off-line Testing of Electric Motors, Baker Instrument Company.

Cuando se encuentre evidencia de daños en el aislamiento causado por fragmentos de las aspas rotas del ventilador dentro del motor, el impacto serán típicamente rasguños que dejan ver el cobre desnudo sin cualquier indicio de arco a menos que las vueltas adyacentes se pongan en contacto y generen un cortocircuito.

Hay que verificar que los conductos de ventilación de todo el estator se encuentren libres de resinas, barnices o cualquier tipo de contaminante que obstruya el franco paso del aire. Las superficies de las bobinas se inspeccionan en búsqueda de suciedad, muestras de lubricante, o humedad. Siempre que se intervengan los devanados de la máquina deben mantenerse con las mismas características eléctricas y mecánicas expresadas por el fabricante.

¹ On-line and Off-line Testing of Electric Motors, Baker Instrument Company.

3.5.2 Sistema de aislamiento

Los materiales y métodos de aplicación utilizados en la totalidad del sistema de aislamiento deben ser iguales o mejores que el empleado por el fabricante de la máquina, además todos los componentes serán compatibles con respecto a las características térmicas, mecánicas y eléctricas. El sistema de aislamiento en lo posible debe resistir la prueba de alto potencial y la operación normal de la unidad, por otro lado, la capa externa de los devanados debe ser suficiente para soportar sobrecargas y sobretensiones, en especial la zona de los cabezales y las uniones entre grupos de bobina.

3.5.3 Conductores

La capacidad de carga de corriente, aislamiento, y cualidades mecánicas de los conductores deben ser convenientes para el ambiente en el que opera la máquina, además la temperatura nominal del aislamiento de los conductores de las bobinas debe ser igual o mayor que la del sistema de aislamiento.¹ Si el material del conductor es cambiado, éste debe ser igual o mejor que el original en todos los aspectos relacionados con el desempeño y operación de la unidad.

Siempre que se realicen cambios en las extensiones de las bobinas conocidas como cabezales deben mantenerse las dimensiones originales de la máquina y en ningún caso pueden ser más largas, a menos que este hecho no represente inconvenientes desde el punto de vista estructural.

3.5.4 Núcleo

La estructura del núcleo del estator se inspecciona cuidadosamente en búsqueda de evidencias de corrosión severa, movimientos y sobrecalentamientos en las

¹ IEEE Std. 1068-1996 "IEEE Recommended Practice for the Repair and Rewinding of Motors for Petroleum and Chemical Industry".

laminaciones, chapas y ranuras sueltas o rotas, espacios de ventilación desajustados, y marcas de fricción que indiquen contacto del rotor con el estator o material que se encuentre capturado en el entrehierro.

Las ranuras del núcleo deben limpiarse procurando no dejar bordes agudos (imperfecciones y rebabas) y partículas que obstruyan el lugar destinado para los conductores, en cuanto a la chapa magnética del núcleo se examina en búsqueda de evidencias de cortocircuitos o “puntos calientes” en las laminaciones.

3.5.5 Cuñas

Las cuñas para los estatores y rotores deben tener la adecuada fuerza mecánica para poder resistir las condiciones de operación normal de la máquina, además, deben encajar ajustadamente en las ranuras para evitar el movimiento de los conductores. Cuando se realice la inspección, hay que verificar que las cuñas de las ranuras no se encuentren sueltas, dañadas, o hayan cambiado de posición.

3.5.6 Conexiones

Las conexiones empleadas para unir las bobinas deben poseer materiales que tengan excelentes propiedades eléctricas y mecánicas para que soporten las condiciones normales de operación, éstas deben ser neutralizadas después de su uso para que no afecten adversamente los conductores ya que algunos pueden reaccionar químicamente. Las conexiones y los empalmes deben construirse de forma que proporcionen igual o mayor conductividad que los conductores que conforman el bobinado.

Las conexiones aisladas deben resistir la temperatura, el voltaje nominal, además las características mecánicas deben ser tales que soporten la normal operación, éstas serán sujetadas de manera conveniente para evitar que ocurran movimientos inadvertidos.

3.5.7 Rotor

Las barras de amortiguamiento de la jaula de ardilla deben ajustarse firmemente en las ranuras del núcleo, en cuanto a los anillos finales se aseguran a las barras por medio de soldadura que esté de acuerdo con los materiales empleados para dicha labor. El bobinado debe mantener las mismas características que las originales a menos que éste se rediseñe teniendo presentes las implicaciones del caso, además debe resistir los esfuerzos mecánicos y térmicos que ocurren durante la operación normal y condiciones anormales –en especial cortocircuitos– de la máquina.

Una inspección general del rotor se enfoca en el estado de las laminaciones, los espacios de ventilación, la condición de las ranuras, y marcas de fricción con partes del estator; si se requiere algo más detallado se procede a observar todas las superficies accesibles de las barras y los anillos de cortocircuito buscando áreas azuladas –que generalmente representan sobrecalentamientos–, grietas, piezas faltantes, movimientos de las barras en las ranuras, juntas de soldaduras deterioradas o porosas, y barras que se hayan levantado fuera de las ranuras bajo la acción de la fuerza centrífuga. En todas las anomalías se registra la locación y la naturaleza de los defectos encontrados.

Cuando el sobrecalentamiento y la fundición de las barras están presentes, los daños más severos se encuentran en la parte externa del rotor, pero cuando el problema es debido a la operación bajo sobrecargas o a la inadecuada ventilación es más probable que el daño del rotor esté dentro de la propia pila de laminaciones del núcleo.¹

¹ “AC Motor repair specification” de NWIBRT.

En cuanto a la jaula la búsqueda de evidencias de arcos o quemaduras a lo largo de los bordes de las barras adyacentes a las ranuras puede indicar que probablemente ésta se encuentra suelta. Si una o más de las barras de la jaula están quebradas o rotas generalmente se opta por el reemplazo de la totalidad de la jaula.¹ Si es necesario el cambio de algunas de las barras debe tenerse en cuenta los materiales de las mismas, las juntas y las recomendaciones del fabricante. Si las barras están sueltas pero sin daño y pueden apretarse mecánicamente, dicha maniobra se realizará cuidando la integridad del conjunto o de lo contrario es más conveniente que cambie por completo la jaula.

Cuando a través de las inspecciones mencionadas anteriormente no pueden determinarse algunos defectos presentes en el rotor, es necesario implementar técnicas más avanzadas que generen resultados que se aproximen más al estado del mismo, estas pruebas se mencionan en las estrategias de mantenimiento preventivo y predictivo de los motores –por ejemplo: el análisis de espectro de corrientes estáticas.

Las tapas de retención o comúnmente llamados anillos de encogimiento usualmente se fijan a los finales de las jaulas de rotores de alta velocidad para contener la expansión centrífuga, en ellos se intentan buscar posibles signos de distorsión y soltura mecánica. Cuando se presentan daños debido a la alta fuerza centrífuga, ésta debe corregirse con el reemplazo y es conveniente que se monitoree las condiciones de operación para determinar las causas de la falla.

3.5.8 Instrumentación y sistemas de control

Termostatos, detectores de temperatura por medio de resistencia (RTD), termocuplas y termistores se examinan en búsqueda de defectos físicos y eléctricos presentes, pero cuando sea necesario el reemplazo de alguna de estas

¹ AC Motor repair specification” de NWIBRT.

partes debe realizarse con elementos idénticos o equivalentes con las características térmicas, mecánicas y eléctricas, y, por supuesto deben ubicarse en las mismas regiones del bobinado donde se encontraban.

En los sistemas de alimentación, control y comunicación la búsqueda se centra en las posibles fallas debidas al calentamiento y a condiciones ambientales a las que se encuentran dichos elementos, éstas pueden tener el aislamiento en malas condiciones, puntos de alta temperatura, picaduras por corrosión y conexiones en pésimo estado.

3.5.9 Accesorios

A los condensadores se les toma el valor de la capacitancia y se les somete a la prueba de alto potencial para corroborar las condiciones de funcionabilidad. Los mecanismos centrífugos, interruptores, y relés de arranque se les verifican la correcta operación mecánica y eléctrica teniendo en cuenta las velocidades y voltajes nominales. Los calentadores del espacio se prueban con corriente o potencia nominal y si es conveniente son sometidos a la prueba de alto potencial.

Los sensores de temperatura de los rodamientos, las protecciones y tarjetas de comunicación de datos deben ser idénticos o equivalentes con los dispositivos originales de la máquina, si éstos se encuentran dañados o en mal estado es conveniente que se reemplacen. En lo posible deben cumplirse las características recomendadas por el fabricante, en especial las que corresponden a la parte térmica y electromecánica.

3.6 Recomendaciones para el rebobinado de la máquina

Para tomar la decisión de rebobinar una máquina de corriente alterna es fundamental determinar el estado por medio de las pruebas e inspecciones recomendadas mencionadas en el mantenimiento predictivo y preventivo de éste

trabajo, porque con ellas puede diagnosticarse la condición en que se encuentra el aislamiento del estator. Por otra parte una evaluación que compare los alcances que tiene la reparación desde el punto de vista técnico y económico puede ser muy útil para tomar la acción más conveniente.

Si estas pruebas no logran los resultados esperados, es necesario discutirlos con bastante mesura para tomar la decisión de rebobinar o intentar un acondicionamiento adicional, aunque nuevamente es necesario que se contrasten los valores obtenidos de las pruebas para poder determinar la efectividad de la labor realizada.

Dependiendo del tipo de arrollamiento de la máquina varían las características de los devanados y la forma en que éstos son arrollados alrededor del núcleo del estator. Para esto se recomienda que las bobinas se arrollen e inserten en las ranuras del yugo con el mínimo de conductores cruzados, y desde luego siempre buscando evitar el daño del aislamiento y los conductores. Las bobinas deben asegurarse firmemente por medio de las cuñas para impedir que se presenten movimientos que perjudiquen el normal funcionamiento del motor.

Al momento de rebobinar es necesario proveer la distancia adecuada para que el rotor y el estator no presenten roces que desemboquen en daños mayores, también debe asegurarse que los conductos de ventilación queden libres y pueda circular sin problemas el aire empleado en el proceso de refrigeración de la unidad.¹

¹ El autor recomienda como referencia la fuente: "Rewinding and Repair of Electric Motor" de Karl Wilkinson. En ésta pueden encontrarse aspectos relacionados con las formas de rebobinar las máquinas eléctricas, tipos de pruebas recomendadas y algunos aspectos concernientes al barnizado.

4 MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE MOTORES DE INDUCCIÓN

En el mantenimiento preventivo se pondrá gran interés en las inspecciones y pruebas que se realizan en el motor, en búsqueda de determinar la condición en la que se encuentra y las decisiones que deban tenerse en cuenta para mantener el equipo en óptimas condiciones de operación. Además se mostrarán las frecuencias de intervención recomendadas por algunos entes involucrados en este tipo de actividades y se expondrán los valores con los cuales puede contarse para dar un juicio favorable sobre la efectividad de las labores de mantenimiento y del estado final en que se entrega la unidad.

4.1 Frecuencias

Las frecuencias pueden variar dependiendo de las condiciones de operación y de los escenarios medioambientales altamente agresivos. Dentro de la implementación de dichos períodos de intervención es importante que a medida que se conoce el equipo y mediante las técnicas predictivas se revalúen los tiempos y siempre se tienda a ejecutar el mantenimiento basándose en la condición.

También es conveniente que se manejen muy bien los tiempos programados pero sin desconocer la intervención del equipo basado en la oportunidad, es decir, cuando ocurra una parada inesperada o alguna situación de fuerza mayor, se aprovecha dicha circunstancia para realizar los mantenimientos previstos, con las implicaciones que tenga desde el punto de vista de alteración de los indicadores que se tienen en cuenta para la evaluación de la gestión del mantenimiento.

Los motores generalmente son muy confiables pero dependiendo de su criticidad y de los ciclos de trabajo es necesario que se realicen inspecciones internas para no arriesgar la continuidad en el servicio o en la producción. La verificación de la condición en la que se encuentra el rotor generalmente se programa durante el cambio de rodamientos, pues puede ahorrarse tiempo y dinero en el aprovechamiento de las paradas para ejecutar la mayor cantidad de labores de mantenimiento apuntando siempre a la confiabilidad del equipo y por ende a totalidad de la planta.

Además las pruebas de aislamiento dependen básicamente de las condiciones del sitio donde se opera la máquina y es recomendable que se incluyan los cables del circuito de potencia que van desde el centro de control de motores hasta la caja de conexión o bornera.

Cada administrador de la planta debe diseñar un programa detallado de mantenimiento preventivo para cada uno de los activos, pero un buen punto de partida puede ser el adoptar como guía la información que ofrece la NETA¹ para implementar dicho programa. Para aplicar correctamente la matriz es necesario reconocer la condición específica, el nivel de criticidad y confiabilidad del equipo.

Tabla 3. Matriz de frecuencia de mantenimiento

Matriz de frecuencia de mantenimiento				
		Condición de equipo		
		Pobre	Medio	Bueno
Requerimiento de la confiabilidad del equipo	Bajo	1,0	2,0	2,5
	Medio	0,50	1,0	1,5
	Alto	0,25	0,50	0,75

Fuente: MTS-2001 Frequency of Maintenance Tests, NETA.

¹ NETA: International Electrical Testing Association.

Un punto importante de resaltar son los datos de las pruebas y del análisis de tendencia para poder enriquecer la calidad del programa de mantenimiento preventivo, porque debido a esta práctica pueden irse modificando las frecuencias para alcanzar un nivel de tiempo adecuado para la intervención.

Con el producto entre las frecuencias que son mencionadas a continuación y el factor arrojado de la tabla anterior puede estimarse un posible intervalo para realizar las inspecciones y pruebas en las máquinas rotativas. Las frecuencias comprenden las siguientes inspecciones y pruebas:

- Visual: 1 mes.
- Visual y mecánica: 12 meses.
- Visual, mecánica y eléctrica: 24 meses.

Las inspecciones, el mantenimiento regular y cuidadoso son necesarios para detectar y despejar cualquier falla lo más pronto posible antes de que se desarrolle en un daño mayor. Los intervalos de inspección por lo tanto deben adecuarse a las circunstancias predominantes como son la suciedad, arranques frecuentes, carga, temperatura, etc., y además, la información adicional proporcionada por el fabricante debe tenerse en cuenta para refinar cada vez más la efectividad del programa de mantenimiento.

Las tareas y los intervalos expuestos a continuación se basaron en las recomendaciones realizadas por las siguientes fuentes: “Operations and Maintenance Manual”, LANL; “Field Commissioning and Maintenance of Electrical Installations and Equipment”, SHELL; Instrucciones para Instalación, Mantenimiento y Servicio, ABB.

Descripción	Días	Meses	Años	Tipo
Limpieza / Condición / Tareas				
Condición externa general			3	Inspección
Condición del rotor y los devanados			4 a 6	Inspección
Lubricación del rodamiento		Particular		Ejecución
Inspeccionar filtros del aire		6		Inspección
Contaminación		1		Inspección
Condición del ventilador			1	Inspección
Limpieza general del motor			1	Ejecución
Revisar monturas y acoplamientos			1	Inspección
Bloqueos en conexión con las partes rotativas			1	Inspección
Pintura y protección contra corrosión			1	Ejecución
Comprobación de los precintos evitando la entrada de suciedad			1	Ejecución
Comprobación del funcionamiento del equipo de control y protección			1	Ejecución
Limpieza de las partes internas de la máquina		Durante revisión general		Ejecución
Condición y soporte de los devanados		Durante revisión general		Inspección
Condición de las cuñas		Durante revisión general		Inspección
Condición del aislamiento del bobinado y barniz de acabado		Durante revisión general		Inspección
Comprobación del óxido causado por vibración en el núcleo del estator		Durante revisión general		Inspección
Comprobación de la condición del bobinado del rotor		Durante revisión general		Inspección
Rodamientos y precintos del rodamiento		Durante revisión general		Inspección
Pruebas eléctricas y mecánicas				
Resistencia de aislamiento			1	Prueba
Índice de polarización			1	Prueba
Aislamiento del rodamiento			1	Prueba
Termografía			1	Monitoreo
Acústicos			1	Monitoreo
Vibraciones		1		Monitoreo
Condiciones de operación				
Voltaje	1			Monitoreo
Potencia	1			Monitoreo
Corriente	1			Monitoreo
Factor de potencia	1			Monitoreo
Revoluciones por minuto (r.p.m.)	1			Monitoreo
Temperatura del devanado	1			Monitoreo
Temperatura del rodamiento	1			Monitoreo
Presión de aceite	1			Monitoreo
Almacenamiento				
Lubricación			1	Ejecución
Prender/operar		3		Ejecución
Rotaciones al eje		3		Ejecución
Inspeccionar los calentadores		3		Inspección
Reparación				
Lubricación del rodamiento		Particular		Ejecución
Reemplazar rodamiento		Particular		Ejecución
Limpieza / Re-aislamiento / Rebobinado		Determinados por las inspecciones y pruebas		Ejecución

El porcentaje de fallas o su recíproco, tiempo medio entre fallas, frecuentemente se utiliza como una guía para establecer el intervalo y la tarea de mantenimiento que debe realizarse. La mayor debilidad al emplear estas medidas para especificar la periodicidad de tareas es que el porcentaje de falla solo determina el promedio del porcentaje de falla, y la realidad es que las fallas son igualmente probables que ocurran en tiempos aleatorios y con frecuencias sin relación con el porcentaje de falla promedio. Por lo tanto, seleccionar el momento específico para llevar a cabo el mantenimiento periódico de un componente con un patrón de falla aleatorio es difícil en el mejor de los casos.¹

Establecer las frecuencias de mantenimiento preventivo es un proceso iterativo, por eso a menudo es necesario prescribir los intervalos de frecuencia al principio con ayuda de las recomendaciones del fabricante, después con la experiencia se pueden alargar estos intervalos. Algunas actividades pueden en realidad ser dañinas si se ejecutan muy seguidas –prueba de alto potencial y engrase de los rodamientos. Si ciertos resultados de las pruebas progresan uniformemente pueden determinarse un intervalo definido y a medida que se tenga más experiencia éste tendería a ser alargado.²

En las siguientes tablas se presentan unas guías para la lubricación de los rodamientos, en la primera se basa en las velocidades típicas de operación y en la segunda el criterio se vale del tipo de servicio que presta el motor. De todas formas hay que aclarar que estas frecuencias pueden verse alteradas por la clase de rodamiento, el tipo de lubricante, el ambiente de operación y las recomendaciones adicionales que proponga el fabricante.

¹ Reliability Centered Maintenance Guide for Facilities and Collateral Equipment, NASA.

² Energy Management for Motor Driven Systems, US Department of Energy, Motor Challenge Program.

Tabla 4. Frecuencias de lubricación de rodamientos (1)

Velocidad rpm	HP	Operación 8 horas/día	Operación 24 horas/día
3600	1 – 25	5 años	2 años
	30 – 40	6 meses	2 meses
	> 40	4 meses	2 meses
1800	1 - 20	5 años	2 años
	25 - 50	4 años	1,5 años
	60 - 75	1 años	4 meses
	> 75	9 meses	3 meses
1200 y menores	1 - 10	5 años	2 años
	15 - 30	4 años	1,5 años
	> 40	1 años	4 meses

Fuente: Preventive maintenance, Richard Okrasa.

Tabla 5. Frecuencias de lubricación de rodamientos (2)

GUÍA LUBRICACIÓN	HP del motor			
	Mayor a 7,5	10 hasta 40	50 hasta 150	Mayor a 150
Sencillo: Operación infrecuente (1 hora por día), válvulas, motores portátiles).	10 años	7 años	4 años	1 años
Estándar: 1 o 2 turnos de operación, herramientas de máquinas, aparatos de aire acondicionado, bandas transportadoras, compresores de pintura, aparatos de refrigeración, bombas de agua, etc.	7 años	4 años	1,5 años	6 meses
Severo: Motores, ventiladores, bombas, operación 24 horas por días, 365 días por año, maquinaria de la minería, siderurgia y petroquímica, motores sujetos a la vibración severa,	4 años	1,5 años	9 meses	3 meses
Muy severo: Suciedad, aplicaciones con vibraciones altas, donde el final de los ejes es caliente (bombas y ventiladores), ambiente hostil.	9 meses	4 meses	3 meses	2 meses

Fuente: Recommended Practice for Electrical Equipment Maintenance, NFPA 70B.

4.2 Procedimiento

En el procedimiento de mantenimiento preventivo se tienen en cuenta las tareas para alcanzar una condición adecuada para la normal operación, éstas se componen de la programación de actividades, recursos y tiempos de intervención, normas de seguridad para el personal y procesos administrativos. También es importante actualizar y mantener los registros en los que el equipo fue intervenido por algún tipo de mantenimiento, ya que con esto puede ahorrarse tiempo a la hora de valorar y entrar a atacar los posibles puntos donde ocurren las fallas más frecuentes.

4.2.1 Planeación y registros

Asignar un tiempo necesario para planear adecuadamente la intervención es una acción muy importante para alcanzar el éxito de la misma. Básicamente todo el trabajo se centra en la administración de los recursos y materiales, el diseño de estrategias alternativas para dar soluciones a inconvenientes que puedan presentarse durante la ejecución, y en la adopción de las medidas de seguridad que minimicen el riesgo inherente de las maniobras.

Si la salida del equipo no coincide con una parada de planta programada, es necesario evaluar el impacto que éste tiene sobre el proceso, por eso algunas de las alternativas es emplear unidades temporales de respaldo, configuraciones de “by-pass” o maniobras operativas que minimicen las pérdidas. Con la revisión de los registros de mantenimiento pasados se encuentran las posibles pautas de reparación, pues en buena parte de éstos se logran determinar ciertos componentes que merecen una inspección más detallada durante la ejecución del mantenimiento preventivo.

Los registros de operación (carga conectada, corriente, velocidad, temperatura, entre otros) con respecto a la lubricación y las temperaturas operativas se revisan

con el fin de obtener un adecuado panorama sobre las condiciones de funcionalidad en la que se halla el sistema. Adicionalmente, es importante corroborar que los datos de placa del motor corresponden con los que se encuentran en sus planos y en los archivos de intervención.

4.2.2 Inspecciones

Las inspecciones básicamente se componen de reconocimientos físicos que se hacen sobre el sistema del cual forma parte el motor a intervenir, algunas de éstas pueden ejecutarse cuando el equipo se encuentra operando, pero la mayoría requiere de una parada que en el mejor de los casos esté programada. El objetivo principal de la inspección es el de proveer información valiosa empleada en el diagnóstico del estado previo al mantenimiento, la experiencia ha demostrado que dicha actividad puede influir de forma considerable en la asignación de pruebas especializadas para determinar la condición del aislamiento.

El orden en que se presentan las inspecciones no interfiere de forma dramática con el fin de la misma, pero en algunos equipos pueden ser más convenientes realizar unas tareas antes que otras debido en gran parte a la complejidad del sistema; y además, algunas de las actividades expuestas no se aplican a la totalidad de la maquinaria debido a que existen unas que cuentan con características especiales que no serán tratadas en este documento.

Durante el funcionamiento normal del motor puede emplearse la inspección termográfica, principalmente para determinar los puntos de alta temperatura en las conexiones eléctricas. Esta técnica normalmente se aplica por medio de una ruta de termografía que proporcione datos significativos al mantenimiento preventivo y predictivo de máquinas rotativas.

Cuando se encuentren piezas faltantes, partes rotas, desgastadas y fuera de forma, deben registrarse para proceder de la manera más conveniente. Si durante

esta etapa del procedimiento algunas de las inspecciones no pueden realizarse debido a que no son fácilmente accesibles ciertas partes de la máquina, éstas pueden ejecutarse cuando a la unidad se le haga el “overhaul” correspondiente.

4.2.3 Pruebas

Existen pruebas que necesariamente se ejecutan antes y después de las labores de mantenimiento, ya que mediante ellas se logra hacer un paralelo entre la condición en la que se recibe el equipo y el estado de entrega del mismo.

Hay que aclarar que la mayoría de las veces es más importante realizar el análisis de tendencia que solo conformarse con los valores absolutos arrojados por una prueba, pues estos estudios llevan inmerso un alto valor cualitativo que enriquecen enormemente la evaluación y el reconocimiento de anomalías presentes en los equipos.

Antes de realizar las diferentes pruebas para determinar la condición en que se encuentra el aislamiento es necesario que mediante una inspección previa se llegue a un dictamen favorable para ejecutar las mismas, pues algunas de ellas pueden resultar bastante destructivas.

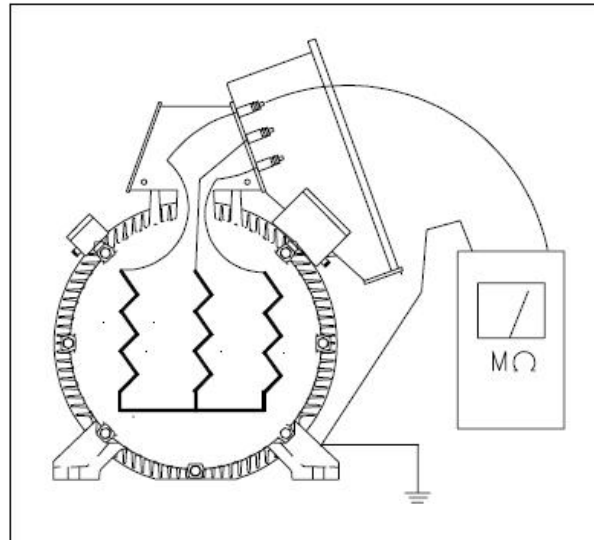
- **Prueba de resistencia de aislamiento** (IEEE Std. 43-2000).

Los valores de la resistencia de aislamiento suministran información de la humedad y grado de contaminación en que se encuentra el aislamiento. Dependiendo del nivel de aislamiento de la máquina y refiriéndose particularmente a la tensión nominal, se determina el valor de voltaje directo de la prueba.

Básicamente lo que se realiza con la prueba es la aplicación de un voltaje directo, a raíz de esto en el aislamiento fluye una corriente de conducción de fuga con unos fenómenos asociados que son generalmente despreciables o que se

extinguen con el tiempo¹; y, a la relación de la tensión de prueba y la corriente principal se le conoce con el nombre de resistencia de aislamiento. El tiempo recomendado para la adquisición de un valor representativo es el que tiene pasado un minuto del inicio de la prueba.

Figura 18. Medida de la resistencia de aislamiento contra tierra



Fuente: HXR Machines, ABB Industry.

- **Prueba del índice de polarización (IEEE Std.43-2000).**

El índice de polarización es una prueba basada en la relación de la resistencia de aislamiento en dos instantes de tiempo definidos, generalmente se toma como la resistencia medida a los diez minutos sobre el valor tomado al minuto del inicio de la prueba –datos tomados permaneciendo siempre la tensión aplicada sobre el aislamiento. En general, una relación baja indica poco cambio, consecuentemente un aislamiento pobre, mientras una relación alta puede indicar lo contrario.

$$PI = R_{10\text{min}} / R_{1\text{min}}$$

¹ Para ampliar el concepto sobre la teoría general de aislamiento se puede recurrir a la sección 5 de la IEEE Std.43-2000.

- **Prueba de factor de potencia del aislamiento o tangente delta $Tan\delta$** (IEEE Std. 432-1992).

En la $Tan\delta$ se representan las pérdidas dieléctricas y de energía en el aislamiento. Se mide en pasos de $0,2 \times V$ hasta la tensión V ¹. La velocidad de ascenso de la $Tan\delta$, como función de la tensión, describe el nivel de descarga parcial tanto en el interior como en la superficie del aislamiento, esto hace difícil determinar el estado del interior del mismo. En cuanto a los devanados viejos, las medidas de $Tan\delta$ no pueden estimar la edad o predecir la falla del aislamiento.

- **Prueba de voltaje de paso** (IEEE Std. 95-2002).

Es un procedimiento en que se incrementa el voltaje en cinco pasos iguales, se mantiene cada nivel aproximadamente un minuto, tomando los valores de resistencia de aislamiento en cada uno de éstos. En general, si se observa una desviación del 25% en las mediciones de resistencia en el rango de voltajes sucesivos, es una indicación de la presencia de humedad u otro contaminante.²

- **Prueba de sobreimpulso comparativo** (IEEE Std. 432-1992, 522-2004, y 792-1995; y NEMA Std. MG 1).

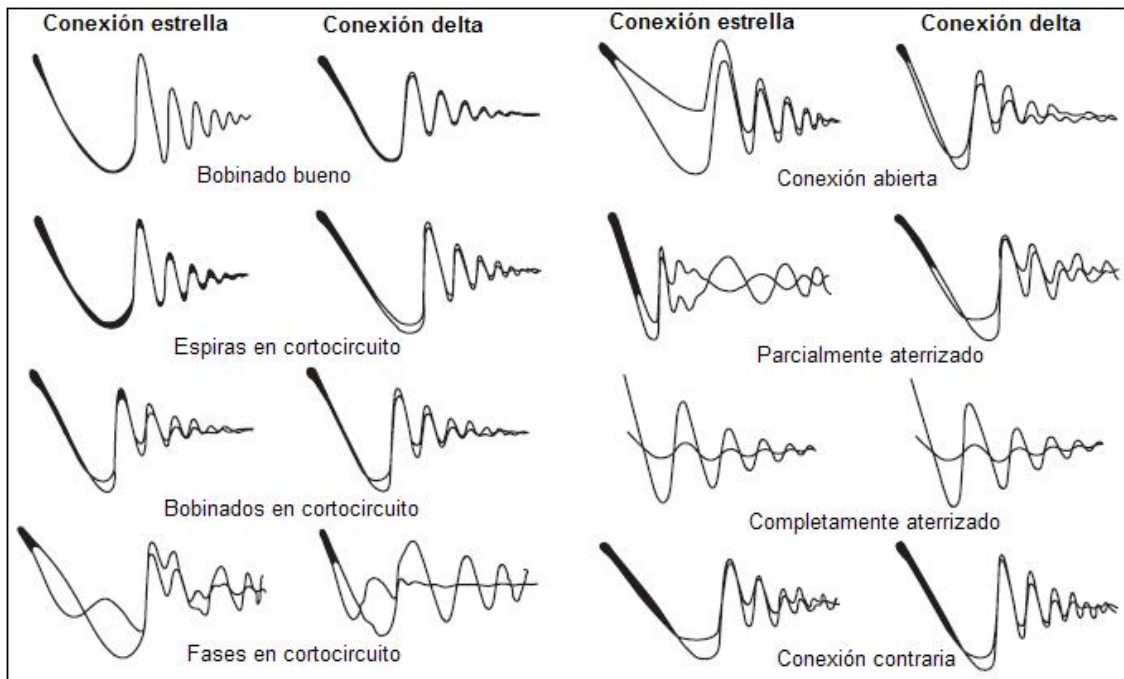
Las pruebas de aislamiento, como la de la resistencia de aislamiento y de alto potencial, ayudan a determinar la integridad del aislamiento a tierra, éstas sin embargo no dan una indicación del aislamiento interno. Cuando un motor es empleado con un variador de velocidad, o cuando una descarga atmosférica arremete el sistema de distribución, unos “sobreimpulsos” de voltaje extremadamente altos son experimentados, especialmente en las cercanías de las

¹ V: Tensión de la prueba, generalmente un valor cercano al nominal de la máquina.

² Guía para pruebas de diagnóstico de aislamiento, Megger.

primeras bobinas del devanado del estator; es esto lo que quiere aprovecharse para la prueba de sobreimpulso.¹

Figura 19. Formas de onda para diferentes fallas empleando la prueba de sobreimpulso comparativo



Fuente: Recommended Practice for Electrical Equipment Maintenance, NFPA 70B.

La prueba de sobreimpulso comparativo es ampliamente empleada para probar los esfuerzos dieléctricos entre bobinas, ésta consiste en la aplicación de un breve impulso de alto voltaje a dos vueltas, bobinados o fases idénticas. Este impulso causa una oscilación en la bobina de prueba que se despliega en un osciloscopio de doble canal, si se presenta una forma de onda estable indica que no hay ninguna avería en el aislamiento. La prueba también produce una comparación cualitativa entre dos vueltas, bobinados o fases, pues puede afirmarse que si la forma de onda es idéntica, esto indica que las bobinas tienen igual impedancia y no hay daño alguno. Especialmente la prueba puede identificar espiras cortocircuitadas en un devanado.

¹ Recommended Practice for Electrical Equipment Maintenance, NFPA 70B.

- **Prueba de aislamiento interlaminar** (IEEE Std. 432-1992).

Principalmente ésta prueba se emplea para determinar posibles daños en el aislamiento entre las laminaciones que componen el núcleo del estator. Recientemente se ha desarrollado una técnica que detecta imperfecciones en el flujo magnético del yugo con la aplicación de unos cuantos kVA, éste consta de un dispositivo de detección de flujo de corriente existente entre las laminaciones que conforman el núcleo.¹

- **Prueba de aislamiento al rodamiento** (IEEE Std. 1068-1996).

Con esta prueba se pretende determinar el aislamiento mínimo necesario para que no se presente circulación de corriente en los rodamientos de la máquina, ya que este fenómeno ataca al lubricante y a las piezas metálicas formando puntos de corrosión. La resistencia de aislamiento debe ser de 1 MΩ o mayor.²

- **Prueba de alto potencial** (IEEE Std. 4-1995 y 95-2002; y NEMA Std. MG 1).

Para la realización de esta prueba se recomienda que primero se realice la correspondiente a la resistencia de aislamiento ya que si no se toman las medidas y la evaluación suficiente puede llegarse a provocar un daño considerable en el aislamiento, además hay que tener en cuenta los materiales de que está compuesto y la edad del mismo.

La aceptación de la prueba de alto potencial –en el argot de los electricistas dicha prueba se le conoce con el nombre de “Hipot”– está basada en que durante la ejecución no se presenten inconvenientes que conlleven a suspenderla, además a

¹ A proposed motor predictive maintenance program, American Electric Power.

² EASA Std. AR100-2001, sección 4, App. 4.2.9, también se tiene como valor de referencia 50 MΩ, propuesto por “AC Motors Repair Specification”, NWIBRT.

la terminación debe inspeccionarse el aislamiento en búsqueda de posibles fallas, es por esto que se le considera como una de las más exigentes debido a que la evaluación se dictamina generalmente en un pasa o no pasa.

- **Prueba de resistencia de los devanados** (ANSI/IEEE Std. 56-1997).

Esta prueba consiste en medir la corriente que circula a través de una fuente de voltaje directo aplicada al devanado, con la relación existente entre dichos valores se calcula el valor de la resistencia. Esta prueba tiene como objetivo verificar la calidad de las conexiones existentes en el motor, encontrar devanados abiertos o en cortocircuito. Generalmente el valor de esta resistencia debe contrastarse con el valor suministrado por el fabricante, además si se presentan desviaciones mayores a un 3%¹ debe considerarse como un posible problema. Los métodos más frecuentes son los que emplean un ohmímetro de baja resistencia o voltímetro-amperímetro.

- **Prueba de corriente**

La prueba de corriente se realiza empezando en vacío, pasando por las demás condiciones de carga hasta culminar con lo que se conoce como estado de plena carga y algunas sobrecargas permitidas, en esta etapa se registran los valores de corriente con sus respectivos datos de carga mecánica conectada al eje.

- **Prueba de intensidad de sonido** (Referencia: NEMA Std. MG 1).

La prueba de intensidad de sonido debe practicarse como una indicación de alguna falla mecánica o eléctrica presente, y como una forma de cuantificar el impacto de la máquina sobre el ambiente en que se desenvuelve. Los dispositivos

¹ Motores de inducción horizontales Custom 8000, General Electric Company.

ultrasónicos pueden detectar picaduras por corrosión y arcos en los rodamientos, y la ocurrencia de descargas parciales en los bobinados.

- **Prueba de velocidad**

La prueba de velocidad de operación sin carga debe realizarse a voltaje y frecuencia nominal, la velocidad será medida y comparada con la nominal de placa, además por razones de seguridad se aconseja que la prueba se realice con un tacómetro que no requiera contacto físico. Cuando se manejan dispositivos de transmisión de movimiento como son las bandas o correas es importante que se midan las rpm¹ en ambas partes, en el motor y la carga para poder determinar diferencias considerables que impliquen posibles acciones correctivas.

- **Prueba de vibración** (Referencia: NEMA Std. MG 1).

Esta prueba puede indicar posibles problemas mecánicos y eléctricos en el motor. Las características obtenidas del espectro de vibraciones (frecuencia vs. amplitud) y la forma de onda en el tiempo (tiempo vs. amplitud) se emplean para identificar los problemas como: desbalance de masa, eje torcido, acoplamientos desalineados, barras del rotor rotas o rajadas, excentricidad del estator, conexiones eléctricas sueltas, roces del rotor contra el estator, soldaduras mecánicas y deterioro de los rodamientos.²

- **Prueba fase única**

La prueba de fase única se realiza con aproximadamente el 10% al 20% de la tensión nominal, ésta sirve básicamente para encontrar defectos en las barras del

¹ rpm: Revoluciones por minuto.

² Energy Management for Motor Driven Systems, US Department of Energy, Motor Challenge Program.

rotor. La máxima variación en la corriente de línea debe ser menor al 3%, cuando el eje se encuentra rotando con la plena carga conectada.¹

- **Prueba Growler**

Esta prueba se emplea en el devanado del rotor, para esto se requiere que el eje se desmonte y quede fuera del estator. La prueba evalúa la integridad del circuito del bobinado del rotor, evidencias de daños y; en especial barras rotas, o desconectadas.

- **Prueba de alineamiento**

Este paso debe realizarse con gran precaución ya que los errores de alineación pueden conducir fácilmente a daños en los rodamientos. La temperatura tiene una influencia considerable y debe por tanto ser considerada durante el proceso de alineación. La temperatura de la máquina es menor durante el montaje que bajo las condiciones de funcionamiento y por esta razón el centro del eje estará más alto en las condiciones de funcionamiento, debido a esto, puede ser necesario realizar una alineación compensatoria; esto depende del tipo de acoplamiento, la distancia entre máquinas, la temperatura de funcionamiento de la máquina conducida, etc.²

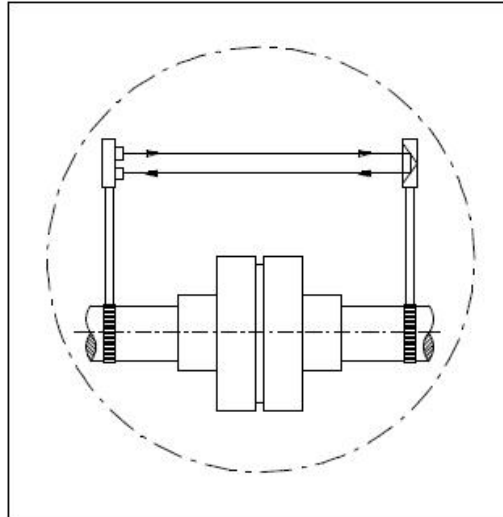
Existen varios métodos de alineamiento de máquinas rotativas dentro de los que pueden mencionarse el de la burbuja y el del láser óptico, éste último el más preciso y confiable de los conocidos actualmente. El método del láser óptico consta de un transmisor localizador y un prisma, el transmisor es un diodo láser y éste se monta en un lado del acoplamiento y el prisma en el otro. El rayo láser emitido por el diodo es reflejado por el prisma hacia el localizador y la desviación

¹ AC Motors Repair Specification, NWIBRT.

² Instrucciones para instalación, mantenimiento y servicio, ABB.

puede detectarse girando el eje. Este método de alineación es particularmente útil cuando la distancia entre los acoplamientos es grande.

Figura 20. Alineación por el método del láser óptico



Fuente: Instrucciones para instalación, mantenimiento y servicio, ABB.

Esta prueba no debe confundirse con la práctica que se conoce comúnmente con el nombre de nivelación, ya que para ésta es preciso conocer el soporte donde se va a ubicar la máquina y propende básicamente a la utilización de calzos o platinas bajo los apoyos de la unidad para alcanzar los límites permisibles de tolerancias.

- **Prueba de balanceo**

El balanceo estático es un balanceo en un solo plano, sin importar la prueba en sí ésta consiste en remover el exceso de peso o añadir igual cantidad en el lado opuesto en los lugares dispuestos para las pesas. Los motores pequeños pueden ser balanceados estáticamente. El balanceo dinámico, también conocido como balanceo en dos planos, es típicamente para dispositivos de rotación cilíndricos y para máquinas de gran tamaño, éste requiere de equipo y personal especializado para su implementación.

4.2.4 Mantenimiento

Esta parte del procedimiento se compone de las acciones propias del mantenimiento, como son: la limpieza del aislamiento, el reemplazo de partes falladas o afectadas y las reparaciones que se deriven de la etapa de inspecciones y pruebas. Las tareas realizadas para su posterior adecuación y entrada al sistema productivo también son tenidas en cuenta, entre éstas pueden mencionarse: armado, pruebas mecánicas (vibraciones, excentricidad y nivelación), pruebas funcionales a los sistemas de control, etc.

4.3 Valores de aceptación de las pruebas

En esta sección se mostrarán los valores de aceptación de las pruebas más representativas en el mantenimiento de motores de inducción, para esto se recurren a los estándares y recomendaciones que hacen los diferentes entes involucrados en la normativa de las máquinas rotativas. Los valores que aquí se proponen deben tomarse como una guía, ya que la última palabra la tiene el encargado del proceso, quien dependiendo de las políticas de la empresa actuará conforme a los intereses que éstas promulguen, sin embargo es un buen punto de partida para tenerlo en cuenta al momento de evaluar el estado de un equipo nuevo o que ha sido intervenido.

- **Resistencia de aislamiento**

La resistencia mínima de aislamiento es el valor que se obtiene de la prueba de la resistencia de aislamiento al minuto IR_{\min} . En este caso la norma que mejor aborda el tema relacionado es la IEEE Std. 43-2000, "IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery". A continuación se presentan las tablas con los valores mínimos recomendados por la IEEE Std. 43-2000 y la NETA, en ésta última se dan los voltajes de prueba en DC.

Tabla 6. Valores mínimos de resistencia de aislamiento a una temperatura de 40 °C

Resistencia mínima de aislamiento (MΩ)	Espécimen bajo prueba
$kV^{66} + 1$	Para la mayoría de bobinados fabricados antes de 1970, todos los bobinados de campo, y otros que no se encuentran en las demás clasificaciones
100	Para la mayoría de armaduras de DC y bobinados de AC construidos después de 1970 (espiras preformadas)
5	Para la mayoría de las máquinas con espiras del estator embobinadas al azar y espiras preformadas con rango menor de 1 kV

Fuente: IEEE Std. 43-2000.

Tabla 7. Valores mínimos de resistencia de aislamiento a una temperatura de 20 °C

Tensión nominal equipo (V)	Voltaje de prueba mínimo, DC	Mínima resistencia de aislamiento recomendada (MΩ)
250	500	25
600	1000	100
5000	2500	1000
8000	2500	2000
15000	2500	5000
25000	5000	20000
35000	15000	100000
46000	15000	100000
69000	15000	100000

Fuente: Acceptance Testing Specifications for Electric Power Distribution Equipment and Systems, NETA.

Otra información muy valiosa y que sirve para ser tomada en cuenta es la que ofrece la “Shell” en su documento “Field commissioning and maintenance of electrical installations and equipment”, el valor mínimo de resistencia de aislamiento a 25 °C se calcula de la siguiente forma:

Después de ejecutar el mantenimiento: $2 \times (kV + 1)$ MΩ.

Listo para la puesta en operación (Equipo nuevo): $10 \times (kV + 1)$ MΩ.

⁶⁶ kV es el voltaje de terminal a terminal de la máquina clasificada, en rms kV.

Las medidas de resistencia deben corregirse de acuerdo a la temperatura con que fueron tomadas, para poder utilizar adecuadamente las tablas anteriores, la NETA recomienda los siguientes factores.

Tabla 8. Factor de corrección de temperatura a 20 °C para las medidas de la resistencia de aislamiento

Temperatura		Multiplicador	
°C	°F	Equipos con aislamiento inmerso en aceite	Equipos con aislamiento sólido
0	32	0,25	0,40
5	41	0,36	0,45
10	50	0,50	0,50
15	59	0,75	0,75
20	68	1,00	1,00
25	77	1,40	1,30
30	86	1,98	1,60
35	95	2,80	2,05
40	104	3,95	2,50
45	113	5,60	3,25
50	122	7,85	4,00
55	131	11,20	5,20
60	140	15,85	6,40
65	149	22,40	8,70
70	158	31,75	10,00
75	167	44,70	13,00
80	176	63,50	16,00

Fuente: Acceptance Testing Specifications for Electric Power Distribution Equipment and Systems, NETA.

- **Índice de polarización**

El valor mínimo del índice de polarización para un devanado de una máquina de corriente alterna, es el más bajo en el cual el embobinado puede someterse a una prueba de alto potencial o de operación sin que se presenten averías. Los valores mínimos recomendados para el índice de polarización están basados en la clase térmica de los materiales de aislamiento y se aplican a todos, indiferentemente de su trabajo de acuerdo con la IEC 60085-01:1984.

Tabla 9. Valores mínimos recomendados para el índice de polarización⁶⁷

Rango de la clase térmica	Valor mínimo PI
Clase A	1,5
Clase B	2,0
Clase F	2,0
Clase H	2,0

Fuente: IEEE Std. 43-2000.

La empresa “Megger” líder mundial en la fabricación de equipos de prueba para la evaluación de la condición del aislamiento propone unos rangos para el índice de polarización, éstos son expresados en la siguiente tabla:

Tabla 10. Valoración del aislamiento con base al índice de polarización

Índice de polarización de la condición del aislamiento	
< 1	Pobre
1 - 2	Cuestionable
2 - 4	OK
> 4	Bueno

Fuente: Guía para pruebas de diagnóstico de aislamiento, Megger.

Los valores mayores a 4 indican equipo excelente para el que probablemente no sea necesaria ninguna acción dentro del mantenimiento inmediato, aunque algunos valores mayores a 5 pueden indicar un posible aislamiento quebradizo o agrietado.⁶⁸

- **Vibraciones**

En la evaluación de las vibraciones es conveniente determinar la severidad y los límites con que puede operarse dentro de las tolerancias permitidas, sin provocar daños especialmente en los rodamientos de la máquina. A continuación se

⁶⁷ Si la resistencia de aislamiento en un minuto es mayor a 5000 MΩ, el índice de polarización (PI) calculado puede no ser significativo, en estos casos la medida del PI no debe ser tomada en cuenta como indicador de la condición del bobinado.

⁶⁸ Guía para pruebas de diagnóstico de aislamiento, Megger.

presentan los diferentes rangos en los que pueden catalogarse los motores de acuerdo con los niveles de vibración obtenidos.

Tabla 11. Tabla de severidad de la vibración

Velocidad rms		Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4
mm/s	pulgadas/s				
0,71	0,028	A	A	A	A
1,12	0,044	B	A	A	A
1,80	0,071	B	B	A	A
2,80	0,110	C	B	B	A
4,50	0,177	C	C	B	B
7,10	0,279	D	C	C	B
11,2	0,440	D	D	C	C
18,0	0,708	D	D	D	C
28,0	1,100	D	D	D	D

Fuente: Recommended Practice for Electrical Equipment Maintenance, NFPA 70B.

Clase 1: Mayores a 20 hp, fundación fabricada en acero.

Clase 2: 25 hasta 100 hp, fundación fabricada en acero, 100 hasta 400 hp, fundación sólida concreto.

Clase 3: Mayor a 400 hp, fundación sólida en concreto.

Clase 4: Mayor a 100 hp, fundación fabricada en acero.

Grado A: Bueno

Grado B: Operable

Grado C: Justamente aceptable

Grado D: No aceptable

Tabla 12. Límites de vibración

Velocidad (rpm)	Frecuencia de rotación (Hz)	Velocidad pico	
		mm/s	pulgadas/s
3600	60	3,8	0,15
1800	30	3,8	0,15
1200	20	3,8	0,15
900	15	3,0	0,12
720	12	2,3	0,09
600	10	2,0	0,08

Fuente: NEMA MG1-1993, Motors and Generators.

Estos niveles pertenecen a la caja de rodamientos, monitoreados en la dirección vertical, horizontal y axial. Las condiciones para la prueba son en desacople y sin carga mecánica.

Tabla 13. Máxima amplitud permitida de vibración

Velocidad (rpm)	Amplitud (Pulgadas pico a pico)
3000 y mayores	0,001
1500 - 2999	0,002
1000 - 1499	0,0025
999 y menores	0,003

Fuente: Acceptance Testing Specifications for Electric Power Distribution Equipment and Systems, NETA.

Los valores de aceptación para las pruebas más especializadas requieren de la participación conjunta de los fabricantes de equipos de prueba y máquinas rotativas, y desde luego del encargado de la administración, operación y mantenimiento de la unidad. Gran parte de las pruebas mecánicas que se ejecutan sobre el motor de inducción se enfocan en mantener los parámetros físicos dentro de unos rangos establecidos de tolerancia.

En este proceso de adjudicar valores de aceptación de los equipos pueden presentarse varias situaciones que motiven al cambio y la reevaluación de los mismos, entre ellas se mencionan: los diferentes materiales empleados en la construcción de la maquinaria, la modificación del ambiente de trabajo, las nuevas normativas y regulaciones y demás circunstancias que afecten la operación y el mantenimiento de la máquina.

5 MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE MOTORES DE INDUCCIÓN

Las técnicas de mantenimiento predictivo no implican la interrupción en el proceso productivo siendo una de sus grandes ventajas, pero, para poder alcanzar los resultados esperados, es necesario poseer el conocimiento del análisis y tendencia de datos, además de los equipos y el personal especializado que permitan obtener un diagnóstico lo más acertado posible.

Muchas de las labores también necesitan ser planeadas de forma conveniente para que se lleve un adecuado registro y análisis de variables involucradas en cada uno de los procesos de diagnóstico de posibles condiciones de fallas funcionales del equipo. Por esta razón varias de las inspecciones, pruebas y monitoreos programados se conocen con el nombre de “rutas”, y en ellas se involucran principalmente la frecuencia y la descripción de la rutina; dentro de las más conocidas y aplicadas en los motores de inducción están: termografía, tribología y vibraciones.

Hoy en día existen varias alternativas en el mercado, donde se ofrecen paquetes de servicios relacionados con el mantenimiento predictivo de las máquinas rotativas, pero donde sea posible debe tenerse en cuenta la relación beneficio en el proceso versus el costo asociado en la implementación de la técnica de mantenimiento.

Gran parte de la información de esta sección se tomó de las siguientes referencias: “A proposed motor predictive maintenance program” de la American

Electric Power, y, de “Reliability Centered Maintenance Guide for Facilities and Collateral Equipment” de la NASA⁶⁹.

5.1 Monitoreo de vibraciones

Como definición de la vibración de la maquinaria y de los sistemas se tiene como el movimiento periódico de un cuerpo sobre su posición de equilibrio.⁷⁰ El monitoreo de vibraciones ayuda a determinar la condición del equipo rotativo y la estabilidad estructural en un sistema, además apoya la identificación y localización de fuentes del ruido aerotransportadas⁷¹.

Generalmente el monitoreo por condición se realiza ya sea por el uso, desbalance, desalineamiento, solturas mecánicas, daños en los rodamientos, daños en las bandas y poleas que intervienen en la transmisión de movimiento o por fatiga de materiales. El análisis de vibraciones puede proporcionar varias semanas o meses de advertencia de la falla inminente. La base para el intervalo de tiempo depende de la experiencia del analista, el tipo, la cantidad y calidad de los datos adquiridos.

Las probabilidades que han encontrado algunos practicantes de las técnicas predictivas de vibraciones muestran que se llegan a niveles de precisión que oscilan dentro del 76% hasta 92%, y el porcentaje de las falsas alarmas cercanas al 8%⁷². Por eso si se escogen los intervalos de monitoreo adecuados y se optimizan los criterios de la selección de falsas alarmas los anteriores porcentajes pueden aún mejorar ostensiblemente.

Una forma de adquirir los datos de ésta técnica es mediante la obtención de la medida total que es simplemente la suma de toda la energía de vibración

⁶⁹ NASA: National Aeronautics and Space Administration.

⁷⁰ A proposed motor predictive maintenance program, American Electric Power.

⁷¹ Se refiere al ruido de las fuentes que se propagan a través del aire.

⁷² Porcentajes obtenidos en los estudios realizados en la Armada Americana.

producida después de las frecuencias filtradas.¹ Ésta medida proporciona un fácil indicador de las mayores fuentes de vibración pero no proporciona un cuadro completo de la condición de los sistemas, por esta razón un programa de mantenimiento moderno no dependerá solamente de un acercamiento de la medida total para un análisis de vibraciones.

Generalmente el análisis del espectro del dominio de la frecuencia es el que comúnmente se emplea como método de análisis para el diagnóstico de máquinas rotativas. Otra técnica es el análisis de forma de onda –o análisis en el dominio del tiempo–, que es herramienta analítica sumamente valiosa, sin embargo no se emplea tan regularmente como el análisis de espectro, pero cabe anotar que dicha práctica ayuda al analista a emitir un diagnóstico más concreto del problema presente en la unidad.

- **Análisis de pulso de descarga**

Esta técnica algunas veces se emplea para detectar los impactos causados por el contacto entre las superficies de las bolas o rodillos y la pista durante la rotación de los cojinetes. La magnitud de estos pulsos depende de la condición de la superficie y la velocidad angular de los rodamientos –rpm y diámetro. La energía del pico es similar en teoría al pulso de descarga.¹

- **Limitaciones**

La efectividad del monitoreo de vibraciones depende del sensor, el montaje, la resolución, el conocimiento y experiencia del analista, la complejidad de la máquina, y las técnicas de adquisición de datos. Además se presentan inconvenientes con máquinas complejas, las de baja velocidad –velocidades menores a 120 rpm–, las de velocidad variable, y las reciprocantes que son

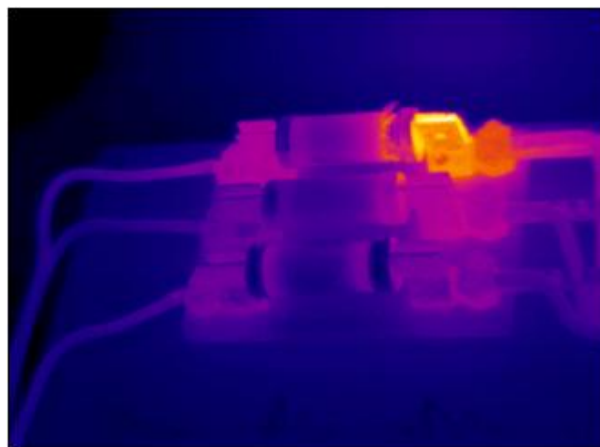
¹ A proposed motor predictive maintenance program, American Electric Power.

sumamente difíciles de supervisar de una manera constante y eficaz. Adicionalmente, el análisis con canal sencillo no siempre puede determinar con precisión la fuente de la vibración en máquinas complejas, por eso es conveniente emplear la técnica de multicanal en éstos casos.

5.2 Termografía infrarroja

Esta técnica permite detectar, sin contacto físico de la unidad bajo análisis, cualquier falla que se manifieste en un cambio de la temperatura de los componentes del equipo, éstos pueden ser: puntos de conexión, rodamientos, bobinados, etc. Esta elevación de temperatura es posible detectarla a través de una cámara termográfica la cual permite apreciar con exactitud cuál es el elemento afectado para hacer el correctivo necesario.

Figura 21. Punto caliente debido a una conexión suelta en una de las fases del circuito de potencia



Fuente: Análisis de las zonas de falla de motores eléctricos, Grupo TERMOGRAM.

Los instrumentos que se emplean en la inspección termográfica se enfocan en ciertas zonas o bandas del espectro electromagnético, en cuanto a los de onda corta son la mejor opción para aplicar en instalaciones debido a su versatilidad encontrada, ya que pueden utilizarse en componentes eléctricos, mecánicos, y

¹ A proposed motor predictive maintenance program, American Electric Power.

estructurales de la gran parte de plantas. Sin embargo, el instrumento de onda corta es más sensible que el de onda larga a las reflexiones solares y el termógrafo tendrá que ser consciente de esto al realizar las inspecciones al aire libre, como es el caso de las subestaciones y líneas de transmisión de energía.

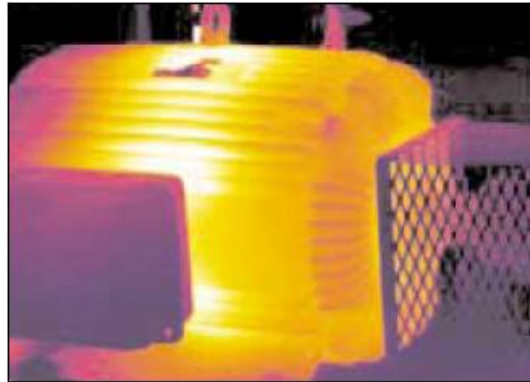
Gran parte de las cámaras que existen en el mercado cumplen con características mínimas que facilitan el almacenamiento de imágenes térmicas –termogramas– y fotográficas, además cada vez son más fáciles de operar y transportar, ahorrando con esto tiempo de entrenamiento y logrando la implementación de sencillas rutas de inspección termográfica en una gran planta de equipos.

Las inspecciones de termografía infrarroja se identifican desde un punto cualitativo y cuantitativo. La inspección cuantitativa está interesada en la medida exacta de la temperatura del componente de interés, para realizar una inspección cuantitativa se requiere el conocimiento detallado y el entendimiento de la relación de temperatura y la energía radiada, reflexión, emitancia, factores medioambientales, y limitaciones en los instrumentos de detección –éste conocimiento debe aplicarse en una forma metódica para controlar adecuadamente el sistema de imágenes y obtener las medidas de temperatura lo más exactas posibles.¹

La inspección cualitativa está interesada en las diferencias relativas, los denominados comúnmente como “puntos fríos”, “puntos calientes” y desviaciones de los rangos normales de temperatura esperados. Las inspecciones cualitativas significativamente consumen menos tiempo porque el termógrafo no se preocupa por la exactitud de la medida de temperatura, pues lo que quiere obtenerse es la diferencia de temperatura entre componentes (ΔT), ya que muchas de las variables que influyen en la inspección cuantitativa son las mismas entre cada uno de los componentes y con esto el termógrafo puede enfocarse rápidamente sólo en las diferencias de temperatura.

¹ A proposed motor predictive maintenance program, American Electric Power.

Figura 22. Termograma donde se muestra un sobrecalentamiento en los devanados del estator



Fuente: Termografía infrarroja para mantenimiento predictivo y preventivo, FLIR Systems.

- **Limitaciones**

La termografía principalmente se limita por la línea de visión. La cámara infrarroja ha restringido la habilidad de ver a través del material, pues la mayoría de los artículos que normalmente se consideran transparentes al ojo humano, como el vidrio y plástico, son opacos a la cámara infrarroja. Además, pueden introducirse errores debido al tipo y geometría material, y a factores medioambientales como la carga solar y efectos debidos al viento.

Tabla 14. Acciones sugeridas basadas en el incremento de temperatura

Diferencia de temperatura (ΔT) basada en comparaciones entre componentes similares bajo cargas similares	Diferencia de temperatura (ΔT) basada en comparaciones superiores entre componente y temperatura de aire ambiente	Acción recomendada
1 °C – 3 °C	1 °C – 10 °C	Posible deficiencia; ordene investigación
4 °C – 15 °C	11 °C – 20 °C	Indica probable deficiencia; repare cuando el tiempo lo permita
—	21 °C – 40 °C	Monitoree permanentemente hasta que las medidas correctivas puedan ser llevadas a cabo
> 15 °C	> 40 °C	Alta discrepancia; repare inmediatamente

Fuente: Acceptance Testing Specifications for Electric Power Distribution Equipment and Systems, NETA.

5.3 Análisis del lubricante

El análisis del aceite lubricante se realiza básicamente para determinar: la condición de uso mecánico de la máquina, la condición del lubricante, y la contaminación del mismo. Para esto existen en el mercado una amplia cantidad de pruebas que proporcionan información con respecto a una o a más de éstas áreas, por consiguiente la prueba ejecutada sobre el lubricante dependerá de la sensibilidad de los resultados, exactitud, costo, construcción y aplicación de la máquina.¹

- **Condición de uso mecánico de la máquina**

El criterio para el análisis del aceite lubricante para determinar la condición de uso mecánico de la máquina es similar al que se realiza con el registro del monitoreo de vibraciones; es decir, se parte de los mismos criterios para la selección de las unidades a las cuales se les debe aplicar dicho estudio, basándose principalmente en el tamaño, costo y criticidad de la unidad.

- **Condición del lubricante**

Generalmente debe partirse por descartar el acondicionamiento a través de filtrado y/o aditivos para el reemplazo del aceite lubricante, ya que es más conveniente tener un juicio sobre el estado del mismo antes de realizar dichas maniobras. Las pruebas que ayudan a determinar la condición del lubricante van muy de la mano del costo asociado a las mismas, por eso, dependiendo de la cantidad de lubricante puede ser más conveniente optar por el cambio basado en el tiempo de operación, ya que saldría más económico desecharlo que reacondicionarlo. También hay que tener presente los costos para los materiales de la muestra y la

¹ Reliability Centered Maintenance Guide for Facilities and Collateral Equipment, NASA.

labor de la recolección, pues éstos son tenidos en cuenta para cada muestra, con la cual pueden realizarse varias pruebas.

- **Contaminación del lubricante**

El aceite lubricante puede contaminarse debido al ambiente de operación de la máquina, a los procedimientos inadecuados de llenado, o a través de la mezcla de diferentes lubricantes. Es por esto, que el estudio debe apuntar a reconocer la causa raíz de la contaminación del lubricante y desde luego eliminar o mitigar la fuente, para poder evitar el daño de la máquina.

Un primer análisis del aceite lubricante debe provenir de técnicas simples aunque algo subjetivas como son la inspección visual y de olor, hasta llegar a otras más sofisticadas que sólo son justificables cuando aportan información adicional relevante y no se desbordan en costos excesivos. A continuación se mencionan algunas de las pruebas que se realizan a las muestras de aceite lubricante de las máquinas rotativas.

- Visual y olor
- Viscosidad (ASTM D445)
- Agua (ASTM D95, ASTM D1744)
- Agua/sólido en por ciento
- Número ácido total, TAN (ASTM D974, ASTM D664)
- Número básico total, TBN (ASTM D664, ASTM D2896)
- Metales espectrométricos
- Espectroscopio infrarrojo
- Contenido de partículas
- Lectura directa de ferrografía
- Ferrografía analítica
- Anticongelante glycol (ASTM D2982, ASTM D4291)
- Agua Karl Fischer (ASTM D1744)

- Espuma (ASTM D892)
- Prevención al óxido (ASTM D665, ASTM D3603)
- Prueba de oxidación bomba rotativa (ASTM D2272)

- **Aplicaciones**

Como ya se ha mencionado anteriormente, gran parte de las aplicaciones tienen en cuenta características de la máquina, criticidad en el proceso y cantidad de lubricante que maneja, pero sobre todo debe evaluarse el costo del muestreo y análisis, para determinar que tipo de labores son más convenientes de realizar.

También hay que mencionar que normalmente a la grasa no se le efectúan las pruebas que se le hacen al aceite, pero sí pueden justificarse económicamente, entraría a jugar un papel significativo el problema que se tiene en la obtención de una muestra representativa. De todas formas el análisis de grasa puede ser útil en el diagnóstico de fallas y por esto no debe descalificarse por completo.

- **Muestreo**

Las muestras de aceite deben coleccionarse de forma segura y de manera que no se introduzca suciedad y otros contaminantes en la máquina o sistema, y desde luego en la muestra. En algunos casos puede ser necesario la instalación de válvulas de muestreo permanente y en otros el empleo de bombas destinadas a la extracción de las muestras de los depósitos.

Para tener una muestra significativa de la máquina, ésta debe coleccionarse de un punto medio en los depósitos y antes de los filtros de los sistemas de circulación.¹ Además, es importante resaltar que cuando se realice la colección de las muestras, éstas deben adquirirse del mismo punto en el sistema para asegurar la

¹ Reliability Centered Maintenance Guide for Facilities and Collateral Equipment, NASA.

consistencia en el análisis de la prueba; por consiguiente, en el procedimiento de muestreo debe proporcionarse la dirección detallada de dónde y cómo conseguir correctamente las muestras.

Cada muestra debe marcarse con el nombre de la máquina o sistema al que pertenece, punto de localización –el sistema puede tener múltiples puntos de muestreo–, fecha, tiempo de operación, y otros comentarios pertinentes y valiosos para tener en cuenta en el análisis.

Figura 23. Muestras de aceite para análisis de tribología



Fuente: Laboratorio de análisis fisicoquímico de la ESSA.¹

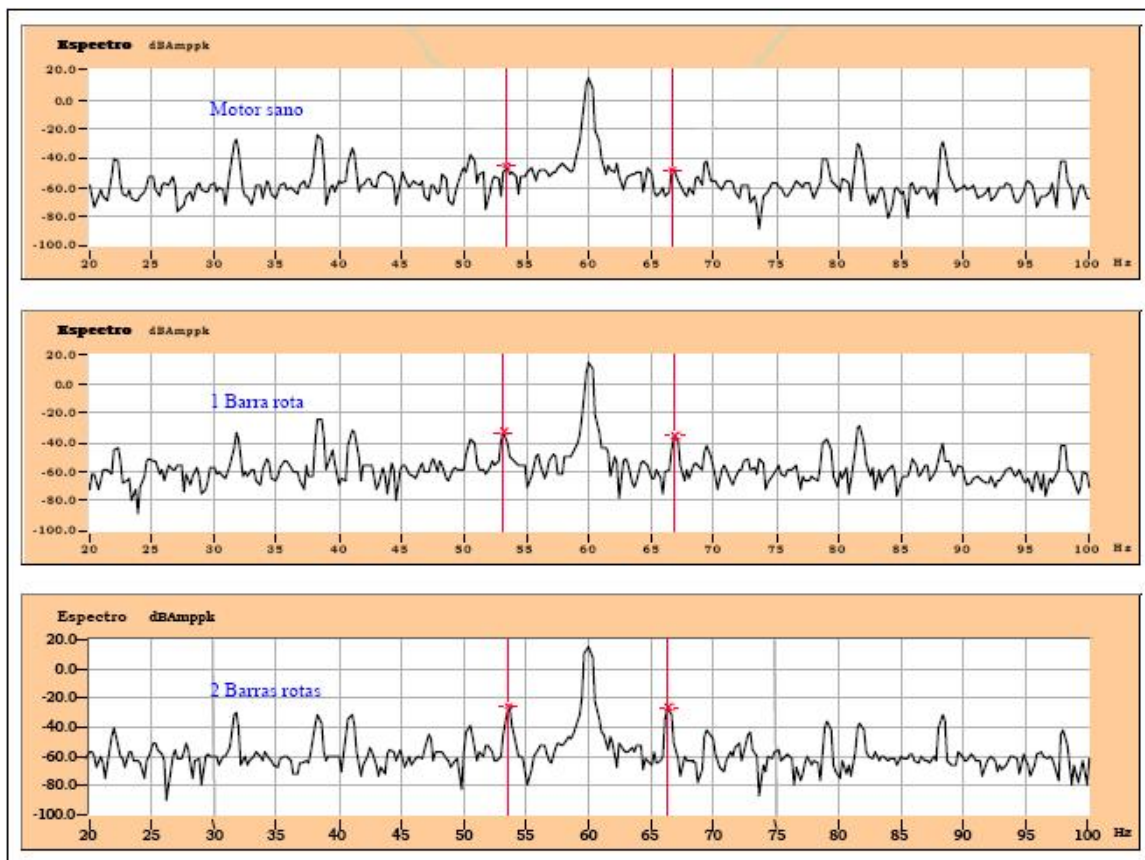
5.4 Análisis de espectro de corrientes del motor (MCSA¹)

El análisis de espectro de corrientes del motor es un método remoto, no invasivo, que se realiza con el equipo en línea y consiste básicamente en el estudio de los datos de las señales de corriente cuyo fin es el de pronosticar los posibles daños en la barras de la jaula del rotor. El espectro de las corrientes del motor en ambos dominios, del tiempo y la frecuencia son adquiridos a través de un amperímetro y son pasados a un analizador de FFT –Transformada rápida de Fourier–, donde los resultados son arrojados en forma de gráficas que posteriormente estarán sujetas al estudio por parte del analista.

¹ ESSA: Electrificadora de Santander S.A.

Los problemas en las barras del rotor aparecerán como bandas alrededor de la frecuencia de la fuente de potencia. El MCSA permite el diagnóstico de circuito de potencia, y además puede realizarse de una manera indirecta midiendo el flujo magnético producido por el motor y analizando los datos por medio del proceso de la FFT para identificar la presencia de frecuencias que se deban a fallas eléctricas.²

Figura 24. Espectros de corriente que sirven para la detección de barras rotas de la jaula



Fuente: Diseño y desarrollo de un sistema de monitoreo de condición para motores de inducción, Universidad de los Andes.

¹ MCSA: "Motor Current Signature Analysis".

² Diseño y desarrollo de un sistema de monitoreo de condición para motores de inducción, Universidad de los Andes.

El gran aporte de esta prueba es la detección de las barras rotas del rotor en los motores con cargas de alta inercia y con tiempos de aceleración largos, ya que generalmente no es necesario realizarla en cargas de baja inercia o a motores de baja tensión, debido a que cuando se presenta una sola barra rota frecuentemente es indetectable y no presenta ningún peligro inmediato al motor; y si se trata de múltiples barras rotas los problemas serán más notorios en la operación, en parte a que los síntomas normalmente no son inmediatos y pueden pasar desapercibidos.¹

Esta prueba se sugiere si se presenta problemas de vibración, considerables sobrecalentamientos, interferencia electromagnética o alguna otra condición que haga pensar que existan múltiples barras rotas. Los datos deben tomarse cuando el motor se encuentra próximo a su condición de plena carga para que el efecto se aprecie de una manera más clara.

5.5 Temperatura de los rodamientos

Los incrementos exagerados y anormales en la temperatura de los componentes de la máquina deben examinarse detalladamente en búsqueda de posibles fallas que afecten el normal funcionamiento de la unidad en el proceso.

Los puntos calientes anormales en la carcasa pueden indicar posibles fallas en los bobinados del estator, esto se aprecia de una mejor manera en la inspección termográfica y un criterio básico es que la temperatura de la superficie de un motor normalmente es 7,5% más baja que la de los devanados, y, las temperaturas de los rodamientos normalmente son superiores en 5 a 20 °F a las que se presentan en la caja o alojamiento de los mismos.²

¹ Diseño y desarrollo de un sistema de monitoreo de condición para motores de inducción, Universidad de los Andes.

² Reliability Centered Maintenance Guide for Facilities and Collateral Equipment, NASA.

Generalmente las empresas que manejan procesos productivos del alto impacto tienen dentro de su monitoreo permanente en las máquinas de gran tamaño y de criticidad en la cadena de producción, límites que se establecen para que la temperatura de los rodamientos se encuentren dentro de los rangos permitidos, a esto se le conoce con el nombre de “ventana operativa”, cuando dichos valores se salen de los niveles, se toman diferentes acciones en las que se tienen en cuenta factores como la desviación y el tiempo de duración; que conllevan a la implementación de decisiones que van desde el monitoreo hora a hora hasta el paro inminente de la máquina.

5.6 Ultrasonido

Principalmente las técnicas de ultrasonido son desarrolladas para la detección de actividades relacionadas con las descargas parciales en los devanados de alta tensión de los estatores. El principio básico de la técnica se obtiene cuando los sensores capturan las emisiones acústicas en un esfuerzo por determinar el nivel de deterioro en que se encuentra el devanado.

Los dispositivos de detección de ruido ultrasónicos operan en el rango de frecuencia de 20 kHz hasta 100 kHz –señales de alta frecuencia para el rango audible. Esto permite al analista ser capaz de percibir los cambios en el ruido asociado a fugas, descargas corona, y otros eventos de alta frecuencia como el asociado al anillo de aceite de las chumaceras y a la excitación de frecuencia resonante causado por lubricación insuficiente y otros defectos menores.¹ Algunos problemas en los rodamientos pueden evidenciarse por medio de esta técnica, pero debido a su análisis especial y costo, es más recomendable realizar el monitoreo de vibraciones para detectar daños en los rodamientos.

¹ Reliability Centered Maintenance Guide for Facilities and Collateral Equipment, NASA.

Los ultrasonidos aerotransportados son subjetivos y dependen de las diferencias percibidas en los ruidos, por eso, para aumentar al máximo la utilidad de esta tecnología debe tenerse gran cuidado en el ajuste de los controles del equipo de prueba para los rangos de frecuencia, sensibilidad, y escala adecuados. Adicionalmente, el analista debe ser conocedor del hecho de que las curvaturas agudas, la presencia de humedad y los sólidos pueden disipar y bloquear la señal ultrasónica.¹

5.7 Interferencia electromagnética

En esta prueba la colección de datos es simple y sólo se necesita que el motor se encuentre cerca de la condición de plena carga. Un análisis del espectro electromagnético que comprenden las frecuencias que van desde 10 kHz hasta 1000 MHz que se adquieren empleando un voltímetro selectivo de radiofrecuencias.

El procedimiento de la prueba no es invasivo, además es seguro, y no tiene impacto en el funcionamiento de motor, pero el gran inconveniente es que el voltímetro selectivo de radiofrecuencias es bastante costoso y la evaluación e interpretación de los datos requiere de un especialista en la materia. Cuando se presentan grandes amplitudes a ciertas frecuencias pueden indicar problemas que van desde la acumulación de suciedad, bobinas sueltas, descargas parciales, hasta daños en los rodamientos.

5.8 Descargas parciales

En el fenómeno de corona se presenta la polarización de moléculas de aire debido a la intensidad de campo eléctrico aplicado y normalmente se asocia con los

¹ Reliability Centered Maintenance Guide for Facilities and Collateral Equipment, NASA.

sistemas de distribución de alta tensión.¹ Las descargas parciales se producen como resultado de una pobre conexión o debido a un problema en el aislamiento, generalmente aparece ruido en la región ultrasónica y luz ultravioleta en el espectro electromagnético que no es normalmente perceptible empleando termografía.

Figura 25. Falla en el aislamiento reconocida mediante una inspección visual



Fuente: How to Identify Stator Insulation Problems Using On-Line Partial Discharge Analysis, ADWEL International.

La prueba mide los niveles de descargas de alta frecuencia, éstas pueden ocurrir en: los vacíos del aislamiento de alta tensión, la superficie de los bobinados cercanos al núcleo y los cabezales del bobinado. Para esto, se emplean detectores de descargas parciales que son acoplados cuando el equipo está detenido, y generalmente los lugares más aptos para dicha labor son los que se encuentran entre pares de ranuras. Ésta técnica no es útil en máquinas de bajo voltaje y en devanados arrollados aleatoriamente.²

¹ A proposed motor predictive maintenance program, American Electric Power.

² How to Identify Stator Insulation Problems Using On-Line Partial Discharge Analysis, ADWEL International.

6 GUÍA DE PROCEDIMIENTO PARA EL MANTENIMIENTO DE MOTORES DE INDUCCIÓN

Cuando en un motor se presenta una falla funcional, lo primero que debe realizarse una inspección general de las partes externas a la unidad, esto es principalmente para descartar todo los daños que no conciernen a la máquina.

Si ocurrió un disparo de alguna de las protecciones, éste provee indicios que sirven para determinar la posible causa de la falla, en éstos casos es conveniente que no se dé arranque al motor hasta que se despeje dicha condición anormal. En primer lugar se verifica la presencia y el nivel de tensión para cada una de las fases. Cuando no hay tensión a la entrada de la casilla –cuando se refiere al término “casilla” se hace alusión a los sistemas de protecciones, control, y fuerza que típicamente se encuentra en el centro de control de motores– puede indicar que una o varias de las fases estén abiertas, o, algunas de las conexiones se encuentren en mal estado, manifestándose como un punto de alta resistencia eléctrica debido a un falso contacto. En este caso es necesaria una inspección más detallada de la parte afectada, para determinar su posterior reparación o reemplazo.

Al llegar a la casilla, se verifica cuales de las protecciones se han disparado, se restablecen sus posiciones de normal operación, en el caso de poseer fusibles abiertos, éstos deben cambiarse por uno de similares características, y por último se hace una inspección general a los demás componentes en búsqueda de daños apreciables a simple vista. Si no se encuentran anomalías, se procede a accionar el interruptor, dicha maniobra preferiblemente se hace sin carga, pero si el sistema de acople es de difícil manipulación, se realiza con la menor cantidad posible de carga enganchada; si el motor arranca de manera adecuada, se espera a que no ocurran disparos de las protecciones, se miden las corrientes de línea y éstas en

lo posible deben ser muy similares; si todas las condiciones anteriores se cumplen, se procede a ir aumentando la carga hasta llegar al estado impuesto por el proceso productivo. En algunos casos no es posible tener un control adecuado de la carga por lo tanto es de suma importancia conocer el escenario en que se desenvuelve el sistema para tratar de estimar cual puede ser la condición de cargado en la que se encuentra.

Pero si el motor no arranca, se verifica la presencia y el nivel de tensión en la caja de conexiones del motor, si estos valores no son los adecuados, el daño se encuentra en el conductor que sale de casilla y llega a la bornera. Para este caso lo más conveniente es el cambio del cable en este tramo. Si el motor no arranca, y después de un tiempo se disparan las protecciones, el problema posiblemente se deba a condiciones de sobrecarga o a que el eje del motor esté bloqueado, en caso contrario la anomalía es probable que sea por causa inherente al motor. Otra condición en la que el motor no arranca de forma adecuada, es cuando éste lo hace tan solo con dos fases debido a que una ellas se halla abierta, para detectar dicha anomalía se recurre a medir tensión o tomar las corrientes de línea.

Si el motor tiene un arrancador estrella-delta, conviene dejar un tiempo considerable para que la carga se enganche y se realice el cambio a delta adecuadamente sin que se produzca disparo alguno, no hay que confundir esta maniobra operativa con una condición de posible falla.

Siempre que se logra un arranque exitoso, se miden las corrientes de línea y se comparan con los niveles para la determinada condición de carga en la que se encuentra, en caso de no ser viable, simplemente se contrasta con el valor tomado a plena carga. En lo posible, éstas serán similares entre sí, y, cualquier variación o diferencia es conveniente que se investigue más a fondo para tomar las acciones correspondientes al caso, entre estas pueden nombrarse: vigilancia permanente, acción operativa o parada de la máquina para prevenir daños mayores.

Algunos fabricantes de máquinas recomiendan números de arranques consecutivos permitidos en intervalos de tiempo definidos, éstos en lo posible deben respetarse ya que una de las partes que más sufre es el aislamiento general del motor.

Las acciones anteriores sirven como parte de un diagnóstico previo. Cuando se determine que la anomalía se debe al motor, lo más conveniente es realizar una inspección general en campo hasta donde el proceso y la misma máquina lo permitan, de ésta dependerá si es necesaria la intervención por el personal especializado de mantenimiento o por el contrario puede restablecerse la condición con acciones menores realizadas en sitio; las demás maniobras operativas como reemplazo de motor, empleo de unidad “by-pass”, desvíos de carga, etc.; correrán por parte del encargado del proceso asociado al motor.

6.1 Intervención del motor de inducción

En este instante se parte del hecho que la máquina será intervenida por personal de mantenimiento debido a que fueron agotadas todas las inspecciones y pruebas que pueden realizarse para intentar restablecer el servicio. Una parte importante de mencionar es la que concierne a la planeación de la parte administrativa que básicamente se conforma de permisos, aspectos de seguridad y en especial la asignación de recursos y materiales necesarios; además, el registro de acciones pasadas que ayudan en la obtención de un mejor procedimiento para la intervención. Para hacerlo más general, se expondrá una guía de procedimiento en la que el motor se lleva al taller para realizar el mantenimiento debido a una falla funcional.

Lo primero que se piensa es en el desmontaje, éste principalmente se compone de la desconexión eléctrica y mecánica, y el proceso de posicionamiento hasta el sitio de embarque. Otro paso importante se refiere al transporte, dónde el vehículo y las condiciones de seguridad juegan un papel trascendental. Algunos equipos

merecen mayor cuidado cuando se realizan éstas maniobras, debido a sus características físicas y a la criticidad en el proceso. Al llegar al taller se tienen en cuenta las mismas consideraciones tomadas en el proceso de embarque, además como recomendación el eje debe bloquearse de manera conveniente al momento de transportar la máquina.

6.2 Inspecciones

En esta parte, se realiza una inspección general del motor, la cual consta principalmente de un reconocimiento físico. En algunos casos no es posible acceder a ciertas zonas del motor debido a su tipo de construcción, en estos casos se realizan solo las inspecciones que no impliquen desarmar considerablemente el motor.

En la sección 6 de la norma IEEE Std. 56-1997, "IEEE Guide for Insulation Maintenance of Large Alternating-Current Rotating Machinery (10000 kVA and Larger)" se describen las consideraciones básicas para tener en cuenta en el momento de realizar la inspección del aislamiento eléctrico del motor de inducción, a continuación se exponen algunos apartes referentes a dicha labor. En cuanto al aislamiento y las bobinas se inspecciona en búsqueda de:

Deterioro o degradación debido al envejecimiento y efectos térmicos, con un interés especial en la identificación de las áreas cercanas a los cabezales de bobina, debido a que ésta zona se expone de manera directa a efectos provenientes del ambiente. En algunos casos es conveniente quitar las cuñas de las ranuras para poder evidenciar mejor el daño.

Sustancias contaminantes como: polvo, hollín, sales, lubricantes y presencia humedad, además de ataques químicos, abrasión y partículas conductivas, en especial en las superficies de las bobinas y sus conexiones.

Señales de grietas y abrasión provocadas por anormales o prolongados esfuerzos mecánicos. Muestras de erosión debidas a la adherencia de partículas que reaccionan vibrando bajo la influencia del flujo magnético de la máquina. Depósitos de color blanco, rojo o marrón que corresponden a descargas corona y a esfuerzos eléctricos. En cuanto al rotor y el núcleo se tiene especial cuidado en inspeccionar en búsqueda de:

Señales de quemaduras, áreas azuladas debidas a la aparición de descargas de alta intensidad (arcos) y esfuerzos térmicos, la parte más vulnerable son las barras y anillos de la jaula de ardilla; además, éstas deben verificarse que se encuentren en buenas condiciones y correctamente ajustadas al núcleo del mismo.

Falla en el aislamiento interlaminar, ésta empieza con manchas o cambios de color en el aislamiento, pintura, y barniz en un área del estator y puede evolucionar a una avería mayor hasta comprometer gran parte de la máquina. La causa de dicha falla principalmente se debe a: daños mecánicos debido al inadecuado montaje y desmontaje, objetos extraños en el entrehierro y arcos eléctricos durante fallas en los bobinados.

Laminaciones sueltas, éstas con el movimiento generan vibración, desgaste del aislamiento interlaminar, cortocircuito entre láminas y calentamiento. Además, por la vibración se genera fatiga y desprendimiento de partículas metálicas que contaminan la máquina. Un problema que involucre varias laminaciones cortocircuitadas genera calentamientos excesivos que producen un agrandamiento del área y de la probabilidad de falla.

Obstrucción y taponamientos por suciedad, contaminantes, lubricantes, mal funcionamiento de los filtros en los pasajes o ductos de ventilación, éstas anomalías no permiten el franco paso de fluido refrigerante. En cuanto a los separadores de los ductos, determinar cuales están sueltos o rotos, debido a que

los fragmentos generan daños mecánicos especialmente en el aislamiento de las bobinas.

Cuando se desmonten los rodamientos y otras partes mecánicas, la inspección debe enfocarse en la búsqueda de deterioro y degradación del aislamiento, además las señales de corrosión en el rodamiento generalmente se deben a un mal aislamiento entre el eje y el mismo, para ampliar el concepto el lector se puede referir a la norma IEEE Std. 115-1965, “Tests Procedure for Synchronous Machines for electrical test procedure”.

Otra de las normas que complementa esta sección del documento es la NETA, “Acceptance Testing Specifications for Electric Power Distribution Equipment and Systems”, 1999. A continuación se mencionan aspectos relevantes que tienen relación directa con las inspecciones sobre los motores de inducción.

Comparar los datos de placa del equipo con los planos y las especificaciones, adicionalmente, si la máquina posee un registro de intervenciones realizadas –en algunas organizaciones se le conoce como “hoja de vida del equipo”– es conveniente tenerlo presente al momento de la inspección, ya que esto significa un ahorro de tiempo en la identificación de las partes críticas donde se presentan las fallas más recurrentes.

Inspeccionar el estado del anclaje y el soporte donde se encuentra ubicado el motor. En esta parte es indispensable la identificación del tipo de empotramiento y la construcción de la superficie de montaje, debido a que esta información es relevante en el proceso de enclavamiento y nivelación de la máquina.

Inspeccionar el estado de los elementos empleados en el sistema de puesta a tierra, entre éstos se tienen: el conductor bajante, los puntos de conexión y el pozo. Uno de los aspectos notables a revisar tiene que ver con la firmeza de las

conexiones, la continuidad y las manifestaciones de los daños por corrosión de materiales.

Las demás inspecciones se tomaron de diferentes normas como son: EASA Std. AR100-2001, "Recommended Practice for the Repair of Rotating Electrical Apparatus"; NFPA 70B, "Recommended Practice for Electrical Equipment Maintenance", 2002 y el documento de ECOPETROL S.A. "Procedimiento de Mantenimiento al equipo eléctrico de la GCB", éstas recomiendan inspeccionar:

- Las señales de advertencia y seguridad (bloqueo y tarjeteo) estén presentes y en el lugar correspondiente para su uso.
- Los dispositivos de bloqueo mecánico se encuentren operando adecuadamente y en buenas condiciones físicas.
- El encerramiento de la máquina en búsqueda de daños, piezas faltantes, corrosión de materiales y el estado general de la pintura.
- El eje en búsqueda de señales de desgaste, fisuras, excoiaciones y deflexión o pandeo.
- Las condiciones que involucren olores raros, éstos pueden deberse a posibles fugas de lubricante y a daños en el asilamiento a causa de sobrecalentamiento.
- Los rodamientos en búsqueda de desgaste, puntos de corrosión y deformaciones mecánicas. En los que son de tipo liso, verificar la condición de los sellos y las empaquetaduras.
- El sitio que aloja los rodamientos y sirve de soporte para el eje que comúnmente se conoce como la "caja de rodamientos", en búsqueda de daños, fisuras y deformaciones mecánicas.

- Las conexiones eléctricas en búsqueda de degradación debido a la presencia de corrosión y puntos de alta temperatura, en termografía algunos de éstos se denominan “puntos calientes”.
- Las cuñas en búsqueda de señales que evidencien movimiento, desgaste y arrastre, la zona más propensa a dichos defectos son los extremos de las mismas.
- El ventilador en búsqueda de grietas y partes faltantes, verificar que esté firmemente montado sobre el eje.
- Todos los demás componentes y accesorios presentes en el motor en búsqueda de daños que puedan ser apreciables a simple vista.

Si durante el momento de la inspección se presentan piezas faltantes, partes rotas, desgastadas y fuera de forma, debe registrarse para ser tenido en cuenta en la reparación y reemplazo de partes.

6.3 Pruebas eléctricas previas al mantenimiento

En esta parte del diagnóstico se realizan pruebas que pretenden determinar la condición en que se encuentra el aislamiento eléctrico, en especial el correspondiente a los devanados del estator de la máquina. En general las normas que tratan sobre pruebas y específicamente las que tienen que ver con el mantenimiento de máquinas rotativas, recomiendan una serie de éstas para el diagnóstico previo a la intervención. Para resaltar este hecho se referencia en especial al estándar: IEEE Std. 56-1997, “IEEE Guide for Insulation Maintenance of Large Alternating-Current Rotating Machinery (10000 kVA and Larger)”.

Algunas de las pruebas se clasifican como “pruebas mínimas”, debido principalmente a la facilidad de implementación, pues son prácticas, de bajo costo

y tienen gran impacto sus resultados sobre el diagnóstico. Otras se denominaron como “pruebas opcionales”, debido a que éstas arrojan valores con información similar, demandan altos costos o se tratan de nuevas tecnologías que no se han posicionando fuertemente en el mercado. En algunos casos es conveniente la realización de dichas pruebas ya que éstas pueden aclarar el panorama en el que se encuentra la máquina, pero siempre teniendo presente el costo asociado a la misma.

6.3.1 Pruebas mínimas

Prueba de resistencia de aislamiento (IR) y la prueba de índice de polarización (PI), se encuentran ampliamente abordadas en la norma: IEEE Std. 43-2000, “IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery”. Los objetivos que se persiguen con la aplicación de este estándar, van desde evaluar la condición del aislamiento para garantizar una operación segura hasta servir de apoyo para la ejecución de la prueba de alto potencial.

Prueba de resistencia de devanados, cuya norma recomendada es la IEEE Std. 118-1978, “IEEE Standard Test Code for Resistance Measurement”. Esta prueba tiene como objetivo verificar la condición de las conexiones eléctricas existentes en el motor, determinando posibles bobinados abiertos o en cortocircuito. Una reducción en la resistencia del devanado puede indicar cortocircuito de los conductores, y un incremento en la misma puede indicar una pobre o mala conexión. Los métodos más empleados son los de: caída de potencial (voltímetro/amperímetro), y el puente Kelvin. Es conveniente que la prueba se realice para cada una de las fases separadamente.

Para tener en cuenta el efecto de la temperatura sobre las medidas la norma a tener en cuenta es la IEEE Std. 119-1974, “IEEE Recommended Practice for General Principles of Temperatura Measurement as Applied to Electrical Apparatus”.

6.3.2 Pruebas opcionales

Prueba de factor de potencia para el aislamiento, cuya norma recomendada es la IEEE Std. 286-2000, "IEEE Recommended Practice for Measurement of Power-Factor Tip-Up of Rotating Machinery Stator Coil Insulation". El factor de potencia (para el aislamiento) representa las pérdidas dieléctricas y de energía en el aislamiento. Se define como la relación entre la potencia disipada en el aislamiento, en Watts, con el producto del voltaje aplicado y corriente de fuga (corriente alterna), en Volt-Amperes.

$$\text{Cos}\theta = \frac{W}{V \times I}$$

Prueba de descargas parciales, el estándar que se refiere a dicha prueba es el IEEE Std. 1434-2000, "IEEE Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery". La prueba mide los niveles de descargas de alta frecuencia. Las descargas parciales, o corona, son chispas o saltos de corriente que se presentan principalmente por daños, imperfecciones y debilidades en el aislamiento. Los sitios más frecuentes de aparición de estas descargas son los vacíos en el aislamiento, la superficie de las bobinas cercanas al núcleo magnético y los cabezales de bobina.

Prueba de sobreimpulso comparativo o también llamada "turn-to-turn". Norma recomendada: IEEE Std. 522-1992, "IEEE Guide for Testing Turn-To-Turn Insulation on Form Wound Coils for Rotating Machinery". Especialmente se emplea para determinar las espiras que se encuentran en cortocircuito dentro de un bobinado.

Prueba de aislamiento interlaminar. Para encontrar información se recurre al estándar de la IEEE Std. 432-1992, "IEEE Guide for Insulation Maintenance for Rotating Electric Machinery (5 hp to less than 10000 hp)". Se emplea

particularmente en la detección de cortocircuitos entre laminaciones que conforman la chapa magnética del núcleo del estator.

En este apartado se mencionaron las pruebas que frecuentemente son utilizadas en el diagnóstico de los motores de inducción, para ampliar más sobre éstas se recomienda al lector referirse a la sección 4.2.3 “Pruebas” del presente trabajo, y consultar cada una de las normas relacionadas.

6.4 Intervención

En este momento ya se tienen juicios suficientes para determinar el tipo de intervención sobre el motor de inducción. La decisión se basa en las inspecciones y pruebas realizadas antes del mantenimiento, y en las políticas de la empresa apoyadas en criterios técnicos y económicos; además, cuando el resultado de éstas es bastante bueno, simplemente se realiza una intervención o mantenimiento menor sobre la unidad.

6.4.1 Limpieza

En esta parte, la limpieza se enfoca principalmente en el aislamiento eléctrico, donde la norma más adecuada es la IEEE Std. 56-1997, “IEEE Guide for Insulation Maintenance of Large Alternating-Current Rotating Machinery (10000 kVA and Larger)”. Indudablemente la contaminación interior es la más difícil de remover y es por esta razón que la forma más efectiva para combatirla se basa en la prevención.

De las cosas importantes para resaltar, es la elección del método de limpieza, pues éste depende de los contaminantes y de las frecuencias de lavado que son afectadas por el medio en el que se desenvuelve la máquina. La limpieza puede realizarse con base a sustancias sólidas, líquidas, gaseosas o una combinación de éstas.

Después de la limpieza y su correspondiente secado dependiendo de la técnica empleada, es necesario inspeccionar la superficie del aislamiento en búsqueda de fisuras y rastros de porosidad generados por los métodos aplicados. Todas estas imperfecciones se corrigen por medio de la aplicación de pinturas, barnices y resinas; dependiendo de la accesibilidad y tamaño del punto a corregir es que se elige la forma de ejecución del tratamiento dentro de los que se encuentran: el sumergir, pintar, rociar o impregnar.

Los contaminantes secos como el hollín, ceniza entre otros se remueven por medio de técnicas basadas en el empleo de lanillas, cepillos y aire a presión¹ (soplado) para los sitios de difícil acceso. Cuando la limpieza se hace por medio de solventes, se tienen en cuenta las recomendaciones de seguridad por parte del fabricante del producto, en especial con el método de aplicación, reacciones químicas con el aislamiento y los inconvenientes para la salud del personal.

Otro método es la utilización de material abrasivo a base de cáscara de nuez, éste se emplea en contaminantes a base de grasa. Hay que tener especial cuidado en la aplicación ya que pueden generarse porosidades en el aislamiento e incrustación en los pasajes destinados a la ventilación de la máquina. La limpieza a base de vapor de agua con partículas de material detergente no conductivo, es muy atractivo cuando la contaminación es provocada por sales. Se requiere del proceso de secado para evacuar la humedad que el método aportó en la aplicación. Por último existe la técnica de lavado con agua², útil cuando hay contaminación con sales y en situaciones en las que la máquina se ha inundado. También necesita de secado para desalojar la humedad presente.

¹ Es conveniente que se tenga cuidado con la presión a utilizar, ya que puede provocar daños considerables al aislamiento. La "Energy Management for Motor Driven Systems", del U.S. Department of Energy, recomienda una presión máxima de 30 psi.

² "Recommended Practice for Electrical Equipment Maintenance", NFPA 70B, recomienda no exceder la presión de 25 psi.

Para el secado del aislamiento se emplean dos métodos que son el calentamiento interno y externo. El primero de estos es preferido debido a que es una técnica más segura. Dentro de los procedimientos de secado pueden mencionarse los que emplean vapor a baja y a alta presión, los calentadores de espacio y la circulación de corriente en los devanados, éste método es algunas veces peligroso porque el calor generado en el interior de las partes no se disipa tan fácilmente.

En la aplicación de pinturas, resinas y barnices dieléctricos, debe asegurarse en lo posible que las zonas del aislamiento afectadas queden reparadas, por esta razón la impregnación por medio de aire comprimido es la más conveniente ya que alcanza partes que son de difícil acceso. Esta se realizará siguiendo las recomendaciones del fabricante del producto, y se aplicarán un número de capas que permita garantizar aislamiento definido para la máquina; debe permitirse el secado al ambiente de cada capa del barniz dieléctrico antes de aplicar la siguiente, para asegurar su correcta adherencia.

La limpieza general del equipo consiste en remover contaminantes, suciedad y otros depósitos que sean extraños a los componentes y áreas del motor, en especial los pasajes destinados para la refrigeración de la máquina. La capa superficial de mugre se quita de varias formas, dentro de los métodos más comunes se encuentran el aire comprimido, el vacío y la limpieza directa con lanillas y cepillos; en algunos casos para mejorar la efectividad de la limpieza se utilizan sustancias detergentes no conductivas y agentes químicos que no propagan la llama.

6.4.2 Actividades mecánicas y otras

En estas actividades se toman medidas de las dimensiones físicas, se ajustan piezas mecánicas y se incluyen las demás tareas que complementan la labor del mantenimiento a los motores de inducción. Para éstas se tienen en cuenta los siguientes ítems:

Apretar y asegurar las conexiones eléctricas y mecánicas, específicamente en las cuñas empleadas en las ranuras. Para esta labor se recomienda el empleo de las tablas de torque¹ suministrada por los fabricantes, en especial se tiene cuidado con el tipo de material y si van lubricados o no.

Tomar dimensiones al eje. Verificar que los valores se encuentren dentro de las tolerancias permitidas. En motores con rodamientos antifricción lo más aconsejable es reemplazarlos, calibrar la caja de rodamientos y comparar con las especificaciones del fabricante.

En motores con rodamientos lisos, se recomienda inspeccionar en búsqueda de desgaste no uniforme y verificar que las tolerancias se encuentren dentro de las especificaciones del fabricante; además el anillo de aceite debe girar libremente, en cuanto a los retenedores si se encuentran en mal estado, deben cambiarse.

Verificar que las tolerancias de los sellos se encuentren dentro de las especificaciones del fabricante. Confirmar la correcta aplicación de los lubricantes recomendados por el fabricante; en los rodamientos con aceite debe drenarse, limpiar el reservorio y cambiar el lubricante.

Aplicar pintura general al encerramiento del motor teniendo cuidado de no estropear la placa de datos. Si la máquina tiene componentes que la identifican por el tipo o sitio de trabajo, dichas especificaciones deben conservarse sin alteración alguna.

Realizar mantenimiento a la caja de conexiones, ésta consiste básicamente de una limpieza, aplicación de pintura y el reemplazo de empaquetaduras. Verificar que el “marquillado” –colores y caracteres alfanuméricos que se emplean en la

¹ El autor recomienda los valores presentados en la tabla 10.12 del documento: “Acceptance Testing Specifications for Electric Power Distribution Equipment and Systems” de la NETA.

identificación en concordancia con los planos– de los cables del sistema de control se encuentre en buen estado.

Verificar que el sistema de aterrizamiento se encuentre conectado correctamente. Realizar pruebas funcionales a los calentadores de espacio (“space heaters”), al sistema de control y de protecciones; verificar el funcionamiento de las alarmas.

Verificar el estado de las RTD, revisando el conexionado de acuerdo con los planos y ajustando a las especificaciones conforme a los niveles impuestos por las “ventanas operativas”. En general, reemplace los elementos y/o accesorios que no estén funcionando correctamente o se encuentren en mal estado.

En esta sección se describieron algunas de las labores más importantes a tener en cuenta en la ejecución del mantenimiento de motores de inducción. Además, se deja claro que para maquinaria especial pueden presentarse ligeras variaciones y actividades que merecen consideraciones particulares que no serán mencionadas en este trabajo.

Si los resultados obtenidos de las inspecciones y pruebas son considerablemente malos, se llega al punto de tomar la decisión de reparar o reemplazar. El criterio tiene en cuenta la gravedad y la zona afectada por la falla. Si la decisión aconseja que se realice el reemplazo, éste involucrará partes y componentes o la totalidad de la unidad. En este caso es necesario el manejo de “stock” de partes y materiales presentes en el almacén, o, la respectiva gestión de compras necesarias para la habilitación del equipo. Pero si la elección apunta a reparar, ésta puede dividirse en dos grandes acciones que son:

6.4.3 Reparación eléctrica

Cuando se determina que a través de los métodos de limpieza no se logra obtener una condición segura para el funcionamiento del aislamiento, o, la máquina ha

sido intervenida en varias ocasiones, la decisión más conveniente es la realización de un rebobinado parcial o general, esto depende básicamente de las características de la unidad y del área involucrada en la falla. Generalmente el rebobinado se ejecuta por personal idóneo para dicha labor y en la mayoría de los casos se requiere enviar la máquina a un taller especializado.

Otro de los componentes que se somete a la reparación es la jaula de ardilla del rotor, en algunas situaciones simplemente se ajustan las barras al anillo de cortocircuito, en otros se aplica soldadura en las uniones o se reemplaza la totalidad de la jaula; se tiene como criterio que al tener dos o más barras rotas o en pésimo estado se lleve a cabo el cambio total¹.

Una de las reparaciones que merecen especial cuidado es la que se refiere a las laminaciones que componen el núcleo, para esto es más conveniente la intervención de un especialista que implemente las pruebas que dan indicios sobre la condición de la chapa magnética. Casi siempre en estos casos se opta por la ejecución de la prueba de aislamiento interlaminar y la norma que aborda dicho procedimiento es IEEE Std. 432-1992. Para ampliar más el tema se recomienda al lector que revise la sección 3.5. “Reparación eléctrica” y la sección 3 “Rewinding” norma EASA Std. AR100-2001.

6.4.4 Reparación mecánica

Esta parte se refiere particularmente a la reparación del eje y los rodamientos de la máquina. Si mediante la inspección se encontró un desgaste uniforme de las piezas sujetas al desgaste que comúnmente se conocen con el nombre de camisas o bujes, deben cambiarse y ajustarse de acuerdo con las tolerancias propuestas del fabricante.

¹ “AC Motor Repair Specification” de NWIBRT.

Si el daño fue mayor y alcanzó a afectar parte del eje, como en el caso de un desgaste o deflexión, es necesario reparar el eje con todas las implicaciones que trae dicha acción o por el contrario realizar el cambio total. Dentro de las labores más frecuentes están: la rectificación y la reconstrucción de partes afectadas.

Al igual que en el rebobinado se requiere de instalaciones adecuadas y personal competente para la ejecución de la reparación mecánica. Por esta razón se tienen en cuenta todas las recomendaciones para la manipulación y transporte de la máquina. Para ampliar más el tema se recomienda al lector que revise la sección 3.4. “Reparación mecánica” y la sección 2 “Mechanical Repair” norma EASA Std. AR100-2001.

6.5 Pruebas eléctricas posteriores al mantenimiento

Lo primero es ejecutar la prueba de resistencia de aislamiento y de índice de polarización, teniendo en cuenta las recomendaciones hechas en la sección “pruebas eléctricas previas al mantenimiento”. En esta parte del procedimiento de mantenimiento se aconseja realizar la prueba de alto potencial, pero teniendo en cuenta que los valores arrojadas por las pruebas anteriores se encuentren en niveles seguros. Dependiendo de las políticas de la empresa y el criterio del encargado del mantenimiento esta prueba puede considerarse como opcional debido a su alto riesgo inherente.

La norma recomendada para la prueba de alto potencial es la IEEE Std. 95-2002, “IEEE Recommended Practice for Insulation of AC Electric Machinery (2300 V and Above) With High Direct Voltage”. Esta prueba se considera una de las más exigentes y puede ser bastante destructiva. Sin importar la manera en que el voltaje es aplicado, siendo ésta directa, gradual o por pasos; el personal debe estar presto a identificar las zonas de aparición de descargas y llegado el caso suspender la prueba para evitar daños mayores a la máquina.

Después de terminar la prueba se examina el aislamiento en búsqueda de anomalías y puntos de posible falla, siempre teniendo en cuenta las recomendaciones de seguridad. En la mayoría de los casos la aceptación de ésta se basa en un riguroso pasa o no pasa, que depende básicamente del comportamiento durante la misma y de la inspección post-prueba. Para ampliar el concepto y las consideraciones para la prueba de alto potencial se referencia la siguiente norma: IEEE Std. 4-1995, "IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing".

6.6 Evaluación¹

En este apartado se evalúa la efectividad del mantenimiento realizado al motor de inducción, con base a todas las inspecciones y pruebas ejecutadas antes y después del mantenimiento; para esto se realizan comparaciones, se verifican que los valores se encuentren dentro de los niveles permisibles y se clasifica en alguna de las siguientes opciones para tener en cuenta las recomendaciones para cada uno de los casos.

- Opción 1. Reparación: Valores bajos, o suspensión de la prueba de alto potencial. Se requiere nuevamente reparación.
- Opción 2. Reemplazo: Valores bajos, no justifica mantenimiento, daños debidos a la prueba de alto potencial.
- Opción 3. Operación bajo condición de duda: Valores aceptables, en algunos casos no se ejecutó la prueba de alto potencial. Se requiere vigilancia permanente y planeación de acciones.

¹ Se recomienda al lector revisar la sección 4.3. "Valores de aceptación de las pruebas".

- Opción 4. Operación segura: Valores buenos, puede operarse con seguridad. Efectiva acción correctiva sobre el motor.

Después de culminar con la evaluación se procede a ejecutar la labor de armado de la unidad. En algunos casos es recomendable realizar pruebas mecánicas de alineación y balanceo antes de embarcar la máquina para que sea llevada al sitio de trabajo, si esto es así debe bloquearse el eje de manera segura para evitar que se desajusten las tolerancias de los parámetros. Antes de realizar cualquier prueba previa a la operación, el motor se monta adecuadamente y, se reinstala eléctrica y mecánicamente con todas las consideraciones necesarias para dicha actividad.

6.7 Pruebas previas a la operación

Se conforman principalmente de pruebas: mecánicas, eléctricas y funcionales. Lo que se pretenden con éstas es garantizar que el motor pueda entrar de manera segura al proceso productivo. Para ampliar algunos conceptos sobre las pruebas se recomienda al lector referirse a la sección 4.2.3 “Pruebas” del presente trabajo.

6.7.1 Pruebas mecánicas

Las pruebas mínimas requeridas son: balanceo, alineamiento y nivelación. En cuanto a la prueba de alineamiento debe efectuarse con gran precaución ya que los errores pueden conducir fácilmente a daños en los rodamientos. Realizar la prueba de balanceo dinámico al nivel especificado por el fabricante, en caso de no existir un requerimiento específico se recomienda un balanceo grado G2.5 (ISO 1940/1)¹. Para culminar con las pruebas mecánicas, es muy importante verificar que las tolerancias se encuentren dentro de los límites recomendados por el

¹ EASA Std. AR-100-2001.

fabricante; ya que al trabajar por fuera de éstas implica la posible aparición de serios problemas asociados con la vibración.

6.7.2 Pruebas eléctricas

Para esta sección se recomienda la norma: IEEE Std. 112-2004, "IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators". Dentro de las que se pueden mencionar se encuentran: sentido de giro, rotor bloqueado, vacío, bajo carga, polaridad y balance de fase.

En la prueba de rotor bloqueado se involucran esfuerzos mecánicos y térmicos bastante considerables que pueden averiar la máquina si ésta no se ejecuta adecuadamente, por lo tanto se recomienda lo siguiente:

- Verificar que los medios mecánicos empleados para el bloqueo estén en óptimas condiciones para evitar daños al personal y al equipo.
- Antes de ejecutar la prueba debe establecerse la dirección de la rotación o sentido de giro.
- La máquina debe estar aproximadamente a temperatura ambiente antes del inicio de la prueba.
- Las medidas de corriente deben tomarse lo más rápido posible, y, para obtener valores representativos, la temperatura de la máquina no debe exceder la nominal más un incremento de 40 °C¹. La lectura para cualquier punto se adquiere dentro de los cinco segundos después de haber aplicado el voltaje.

¹ IEEE Std. 112-2004

Junto con la prueba de vacío que se emplea para determinar las pérdidas debidas a la fricción, puede obtenerse el modelo de parámetros del motor de inducción, que es útil para contrastar los valores que se manejaban antes del mantenimiento, especialmente cuando la máquina ha sido rebobinada.

6.7.3 Pruebas funcionales

Las pruebas mínimas requeridas son las que se ejecutan a los sistemas de control y protección, verificando el correcto funcionamiento de las alarmas y dispositivos sensores. Básicamente se realizan pruebas de continuidad a los cableados de control, simulaciones y pruebas de funcionamiento de los sistemas asociados a la unidad.

Por último queda por coordinar la entrada en operación de la máquina, con una vigilancia permanente durante el tiempo que se estime conveniente, esto depende típicamente del proceso productivo. En cuanto a la parte administrativa, se culmina con el diligenciamiento de los registros, observaciones y recomendaciones concernientes a la labor de mantenimiento.

7 ANÁLISIS DE LAS PRINCIPALES NORMAS EMPLEADAS EN EL MANTENIMIENTO DE MOTORES DE INDUCCIÓN

En general las normas y estándares son documentos que se presentan como guía para el personal involucrado con un tema específico, por ningún motivo pretenden ser imperativas o impositivas, y mucho menos se empeñan en contradecir las recomendaciones del fabricante.

En esta sección se exponen las principales normas empleadas en el mantenimiento de motores de inducción, haciendo una breve descripción del objetivo y alcance de la misma; y, adentrándose en ciertas partes que merecen un especial cuidado y atención. Algunos ítems son abordados por varias de las normas, por lo cual el autor simplemente hace mención y se refiere a éstos en base al documento que mejor lo presente.

7.1 EASA Std. AR100-2001

“Recommended practice for the repair of rotating electrical apparatus”

El objetivo principal de la norma es establecer una guía para la reparación y el rebobinado de máquinas rotativas, tanto de corriente alterna como de corriente continua. Dentro del alcance se excluyen los motores de servicios especiales, los que son a prueba de explosión e ignición con polvo, los de locaciones peligrosas, los herméticos, los sumergibles y los destinados a procesos nucleares. En general el documento describe los cuidados, pruebas y criterios básicos para la reparación de motores y generadores eléctricos. Éste se compone de tres partes principales a tener en cuenta:

- **Reparación mecánica**

Esta sección se enfoca principalmente en los ejes y el sistema de rodamiento del motor, mencionando algunas de las inspecciones necesarias para reconocer el estado de los materiales del que se componen las partes mecánicas. Además, se presentan tablas de valores donde la NEMA y la IEC recomiendan tolerancias permisibles que son empleadas como valores de aceptación para las pruebas mecánicas que se realizan a las máquinas rotativas.

También se adjuntan las tablas de tolerancias de excentricidades para los diferentes tipos de montaje de máquinas, pero no se tienen en cuenta las de diseños especiales en el empotramiento y enclavamiento, y tampoco, las que trabajan con el eje en posiciones diferentes a la horizontal y a la vertical; generalmente estos casos no ocurren en las máquinas eléctricas, pero pueden presentarse en procesos bastante peculiares.

- **Rebobinado**

En esta parte se mencionan algunos cuidados y consideraciones básicas que son importantes tener en cuenta para el rebobinado de la máquina. Se hace hincapié en que las partes del devanado que van a ser reemplazadas tengan las mismas especificaciones o en su defecto sean mejores. También se dan recomendaciones menores sobre la impregnación del bobinado para que ésta no afecte el aislamiento total de la unidad.

- **Pruebas**

En esta sección se mencionan algunas de las inspecciones generales que se emplean para determinar el daño o la degradación del aislamiento, pero la parte fuerte se enfoca hacia las pruebas recomendadas para evaluar la condición del mismo, en la gran mayoría simplemente se remiten a otras fuentes para

profundizar sobre las consideraciones a tener en cuenta en la ejecución de las mismas.

En un apartado de esta sección se recomiendan las pruebas para los bobinados del estator, del rotor jaula de ardilla y rotor bobinado, y los demás devanados de las máquinas sincrónicas y de corriente continua. Dedicar gran parte a mencionar las implicaciones que tiene la realización de la prueba de alto potencial y aconseja que en el mejor de los casos se ejecute con voltaje directo, debido a que los daños que se presentan son menores que los que ocurren con el voltaje alterno. También recomienda que se realice la prueba de resistencia de aislamiento antes y después de la prueba de alto potencial. No es conveniente que la prueba de alto potencial se ejecute varias veces seguidas, debido a que los esfuerzos eléctricos en el aislamiento pueden llegar a averiarlo considerablemente.

Dedicar una parte a clasificar los devanados dependiendo de su condición, esto es útil en la aplicación del voltaje para la prueba de alto potencial; a los nuevos (máquinas nuevas) se les aplica el voltaje de prueba original, a los rebobinados (máquinas rebobinadas) se les aplica hasta el 85% del voltaje de prueba original, a los reacondicionados (devanados reparados) se les aplica hasta el 65% del voltaje de prueba original, y para los bobinados que no han recibido ningún tipo de acondicionamiento solo recomienda que se ejecute la prueba de resistencia de aislamiento.

Por último recomienda otras pruebas de índole típicamente mecánico dentro de las que pueden destacarse: prueba de velocidad, temperatura de los rodamientos y prueba de vibraciones, para ésta en particular presenta una tabla que sirve de referencia para los valores límites permitidos. Además, se presenta al final un anexo correspondiente a las consideraciones mínimas de seguridad que se tienen en cuenta para la ejecución de las pruebas eléctricas.

7.2 NETA

“Acceptance Testing Specifications for Electric Power Distribution Equipment and Systems”, 1999.

En este documento se presentan las inspecciones y pruebas recomendadas para la aceptación de equipos eléctricos nuevos, debido a que éstos pueden venir con inconvenientes de fábrica y/o a causa de la instalación. El principal fin de la ejecución de éstas es el de corregir daños y problemas bajo el amparo de la garantía. Cabe mencionar que los resultados arrojados por las pruebas ejecutadas a las unidades nuevas sirven como punto de referencia para determinar los valores de aceptación empleados en la evaluación de la labor de mantenimiento.

Además sus anexos se conforman de tablas con valores de aceptación para las pruebas que se realizan a equipos eléctricos, dentro de éstas pueden mencionarse como las más relevantes para el caso de motores de inducción las que se refieren a: valores recomendados para la prueba de resistencia de aislamiento, valores límites para la prueba de vibraciones, voltajes para las prueba de alto potencial, tabla de torques, y criterios basados en diferencias de temperatura empleados en termografía infrarroja.

Algunas de las pruebas propuestas por la NETA se distinguen por la clasificación de “opcional”, esto quiere dar a entender al ejecutor que queda bajo su criterio la realización de las mismas. Dentro de lo que puede tenerse como criterio, se encuentra: otras pruebas pueden arrojar información similar, el costo asociado, o que se trate de nuevas tecnologías que aún no se han posicionado fuertemente en el mercado. Generalmente esta norma es aplicable a sistemas eléctricos comerciales e industriales, y no se compromete con actividades peligrosas y de alto riesgo, para estos casos pueden recomendarse los siguientes entes: NFPA, OSHA y las API¹ entre otras.

¹ API: American Petroleum Institute.

Se presenta un capítulo reservado para máquinas rotativas de corriente alterna y directa, éste se compone de tres secciones a tener en cuenta. La primera se dedica a la inspección visual y mecánica que se realiza como reconocimiento previo de la condición del equipo. En la segunda sección se mencionan las pruebas eléctricas recomendadas y en la última parte se referencia los valores de las pruebas realizadas con los límites establecidos en las tablas del anexo del documento. Como este ente se dedica principalmente a la prestación de servicios para la industria, actualmente ofrece al público los siguientes documentos de apoyo y consulta: “Electrical Acceptance Testing Specifications” y “Electrical Maintenance Testing Specifications”, además de artículos de interés en las áreas de mantenimiento y pruebas eléctricas.

7.3 NFPA 70B

“Recommended Practice for Electrical Equipment Maintenance”, 2002.

Uno de los propósitos de este documento es mostrar al lector un programa de mantenimiento preventivo para el equipo eléctrico, en especial de las plantas industriales y actividades de gran riesgo. La norma presenta un capítulo dedicado al mantenimiento de las máquinas rotativas. A continuación se reseñan algunos de los puntos que tienen importancia en la ejecución del mantenimiento correctivo de motores de inducción.

En cuanto al lavado del aislamiento se aconseja no exceder una presión de 1,72 kPa (25 psi) del fluido empleado en la limpieza. En el secado recomienda que por seguridad se realicen los métodos de calentamiento externo, y no se inclina por los internos debido a que el calor generado en el interior de las partes de la máquina no se disipa tan fácilmente.

En lo que se refiere a los rodamientos, se toman cuatro mediciones de las dimensiones físicas; éstas se ejecutan en los soportes de los ejes, espaciadas 90°

una de otra; de esta manera son comparadas con los valores de la máquina nueva para indicar un posible desgaste prematuro. Para la prevención de la corrosión en el eje y los rodamientos lisos no deben permitirse la circulación de corrientes parásitas, para contrarrestar este efecto se recomienda el empleo de pedestales o soportes aislados.

Para la prueba de alto potencial recomienda que las máquinas nuevas se prueben con un valor de voltaje igual al doble de la tensión nominal más 1000 Volts AC; en motores viejos y reparados éste valor se reduce hasta en un 50%. Cuando se ejecutan pruebas con voltaje directo se tendrá en cuenta el factor de 1,7 para representar la relación entre el voltaje medio y el voltaje RMS.

La norma también dedica un capítulo exclusivo al tema de las vibraciones, el cual menciona tres métodos comunes (desplazamiento, velocidad y aceleración) para la medición de las mismas. Recomienda que para motores de baja velocidad y vibraciones de baja frecuencia se empleen las medidas de desplazamiento y para los problemas de alta frecuencia se utilicen alguna de las técnicas restantes. También aconseja que las mediciones sean tomadas en el soporte de los rodamientos o en el apoyo del eje.

7.4 IEEE Std. 43-2000

“IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery”

Los principales objetivos de la norma son evaluar la condición del aislamiento para garantizar una operación segura y, apoyar la decisión de ejecutar la prueba de alto potencial en máquinas rotativas.

Un concepto mencionado es el referente a la electroendosmosis, éste un fenómeno que especialmente se presenta en los bobinados viejos y se manifiesta cuando en presencia de humedad se obtienen diferentes valores de resistencia de

aislamiento al invertir las puntas del medidor. Por esta razón, la norma aconseja que preferiblemente la medida se tome con polaridad contraria para que se tenga en cuenta dicho efecto.

La norma propone una tabla guía para la asignación de los voltajes directos de prueba empleados en la ejecución de la misma. Como recomendaciones de seguridad, el bobinado se descargará adecuadamente antes y después de la realización de la prueba de resistencia de aislamiento; un tiempo de descarga recomendado es cuatro veces el tiempo de aplicación del voltaje durante la prueba. Además, dedica una sección a explicar de una manera muy práctica la teoría general del aislamiento y muestra el modelo aplicado en voltaje directo; por otro lado presenta algunos de los factores que afectan los valores de la resistencia de aislamiento y dentro de los cuales pueden nombrarse:

- **Contaminación**

Afecta de manera directa a la componente de corriente superficial de la corriente de fuga total, en este aspecto influye de gran modo el ambiente en que se desenvuelva la máquina. Además, la mayoría de las materiales contaminantes reaccionan de forma desfavorable cuando se suma el efecto que genera la humedad.

- **Humedad**

Principalmente las máquinas en servicio y las que están almacenadas por largos períodos deben mantenerse por encima del punto de rocío para evitar que exista la condensación. Cabe mencionar que mientras el motor se encuentre en bodega o parado durante un lapso de tiempo considerable es necesario que se activen los calentadores de espacio (“space heaters”), o de lo contrario es inevitable realizar una limpieza de los bobinados, para esto se recurre a los resultados arrojados de la prueba de resistencia de aislamiento.

- **Temperatura**

Las medidas deben corregirse –la norma propone una gráfica guía– debido al efecto térmico. Para el índice de polarización no es necesario tener en cuenta la temperatura, a menos que ésta cambie apreciablemente entre las lecturas tomadas al minuto y a los diez minutos del inicio de la misma.

- **Magnitud del voltaje**

Un significativo decremento en la resistencia de aislamiento debido a un incremento en el voltaje aplicado puede ser un indicativo de problemas presentes en el aislamiento, para esto es recomendable tomar las medidas y analizar la tendencia.

- **Carga residual**

Siempre se considera un pequeño error en la medida de la resistencia de aislamiento, debido a la existencia de cargas residuales en el aislamiento que se presentan en mayor grado cuando se han ejecutado pruebas recientemente o cuando no se ha descargado correctamente el material aislante. Como recomendaciones para tener en cuenta a la hora de realizar ésta se tienen: registro de la temperatura ambiente, humedad relativa, punto de rocío, temperatura del bobinado, voltaje de prueba y diagrama de conexionado; esto es necesario para la corrección de la medida a 40 °C, para futuras comparaciones bajo condiciones similares de prueba y estudios de análisis de tendencia.

En cuanto al conexionado se recomienda cuando sea posible aislar cada fase y probarla separadamente, ya que esto permite una comparación de las lecturas para cada una de las fases. Cuando una fase es probada las otras dos se aterrizan convenientemente a la misma tierra del núcleo del estator, pero cuando

no puede realizarse dicha maniobra, se ejecuta la prueba con todas las fases simultáneamente y con esto se determina el aislamiento del conjunto con respecto a tierra.

Una recomendación referente al equipo de prueba tiene que ver con el aseguramiento de un voltaje constante durante la duración de la misma. En la interpretación de los resultados arrojados por la pruebas es conveniente que si el valor de la resistencia de aislamiento al minuto y corregido a 40 °C es mayor a 5000 MΩ, el índice de polarización puede ser ambiguo y por esta razón es mejor que no se tenga en cuenta para efecto de análisis.

Valores altos del índice de polarización (mayor a 8) pueden indicar que el aislamiento esté frágil y quebradizo, debido a esto, no se aconseja realizar labores de limpieza y mucho menos ejecutar la prueba de alto potencial. Dentro de las limitaciones que tienen las pruebas de resistencia de aislamiento y de índice de polarización pueden mencionarse las siguientes:

- Una simple medida de resistencia de aislamiento a un voltaje particular no indica si el material extraño como es el caso de los contaminantes, se encuentra concentrado o distribuido a lo largo del bobinado.
- Medidas de resistencia de aislamiento y de índice de polarización no detectan vacíos en el aislamiento, causados principalmente por la inapropiada impregnación y por deterioro térmico.
- Debido a que la prueba de resistencia de aislamiento generalmente se hace con la máquina parada, ésta no detecta problemas debidos a la rotación, como bobinas sueltas o vibración debido al movimiento de los devanados.

Una de las secciones de la norma se dedica a presentar los valores mínimos recomendados para la aceptación del equipo, en ella se consignan dos tablas que son de suma importancia para la evaluación del mantenimiento. Por último presenta tres anexos que mencionan aspectos relacionados con: variantes en el índice de polarización, confrontación entre el voltaje de prueba AC y DC, y regulación de las fuentes de potencia empleadas en las medidas de resistencia de aislamiento.

7.5 IEEE Std. 95-2002

“IEEE Recommended Practice for Insulation Testing of AC Electric Machinery (2 300 V and Above) With High Direct Voltage”

La norma recomienda métodos de prueba para el aislamiento empleando alto voltaje directo, además provee una guía para el análisis del comportamiento de la corriente de fuga (I de fuga vs. Voltaje aplicado). También dedica una sección que compara las técnicas que utilizan alto voltaje directo y alto voltaje alterno.

Por ser una prueba bastante exigente para el material aislante, se tienen en cuenta las medidas necesarias para la seguridad del personal y de los equipos asociados. Entre los problemas que son reconocidos por medio de la prueba de alto voltaje directo se encuentran: las fisuras, grietas, contaminación, absorción de humedad, y vacíos del material aislante. El estándar presenta un cuadro comparativo de las ventajas y desventajas entre las diferentes técnicas (alto voltaje directo y alterno), dentro de las cuales se mencionan:

- **Ventajas**

La fuente de voltaje directo tiene facilidad para el transporte, es más liviana y práctica en el manejo. Los daños que se generan son menores, comparados con los que ocurren cuando se realiza la prueba con alto voltaje alterno.

- **Desventajas**

Bajo ciertas condiciones se requiere para la interpretación de resultados un nivel de destreza por parte del analista. Algunas fisuras y grietas no son detectadas sino se encuentran contaminadas con humedad, polvo u otro material conductivo. En ciertos casos no se manifiestan físicamente los vacíos causados por la inapropiada impregnación y por deterioro térmico.

Por otra parte al referirse al término de electroendosmosis se tiene: “La migración de humedad dentro del material sólido estacionario, bajo la influencia de un campo eléctrico aplicado, va hacia un electrodo. El movimiento neto de moléculas de agua es generalmente hacia el electrodo cargado negativamente”. Para tener en cuenta el efecto es necesario intercambiar las puntas del instrumento de medida.

Donde sea práctico y necesario, se realiza la prueba de alto potencial a cada una de las fases aisladas, de lo contrario se ejecuta con el conjunto contra tierra. Al igual que la prueba de resistencia de aislamiento se requiere que el equipo de prueba tenga una fuente de voltaje que mantenga su nivel de tensión constante, debido a que todas las imperfecciones como el caso de las fluctuaciones en la forma de la onda de voltaje, repercuten en la efectividad de la prueba reflejándose en los resultados arrojados por la misma. Además, la fuente de voltaje debe ser ajustable, y su control debe permitir pequeños incrementos en la tensión para lograr varios niveles de forma gradual.

Los dispositivos empleados para la prueba de alto potencial deben poseer sistemas que aseguren la descarga después de la misma o cuando ésta es interrumpida por diversos factores, dentro de los que se encuentran: la interrupción intencionada para evitar daños mayores y los que se presentan por el accionamiento de protecciones ante la aparición de situaciones de fallas.

En los electrodos de prueba hay que tener un especial cuidado debido al efecto corona y a los saltos de corriente visibles (“flashover”), ya que éstos pueden generar interrupciones de la prueba y/o arrojar resultados erróneos. Para combatir estos efectos, se emplean distancias dieléctricas adecuadas, materiales aislantes y calibres de conductores convenientes. La norma muestra en uno de sus apartados un esquema típico de conexión para pruebas de alto voltaje continuo.

En cuanto al sistema de aterrizamiento debe ser fuerte y no debe permitir movimiento por equivocación, las conexiones serán visibles y los demás elementos cercanos se pondrán a tierra de forma conveniente. Adicionalmente, un inadecuado aterrizamiento puede comprometer la calidad de los datos y la interpretación de los mismos.

Para determinar el voltaje para la prueba pueden tenerse como base el siguiente rango de valores recomendados: el 125 al 150% del voltaje nominal RMS de la máquina, o, 65 a 75% de dos veces el voltaje nominal RMS más 1000 Volts. Además, se tendrá en cuenta el factor de 1,7 para la aplicación del voltaje directo. Por seguridad, después de realizar las pruebas debe descargarse y aterrizarse adecuadamente las partes sometidas a ésta; además, si se requiere acelerar la disipación de carga residual se aplicará un voltaje (directo o alterno) en polaridad opuesta a la empleada durante la prueba.

En cuanto al mantenimiento, la duración de la prueba es de alrededor de un minuto y la aceptación de la misma se basa en “un pasa o no pasa”, refiriéndose de manera particular al aislamiento. Para esto no deben existir evidencias de daños físicos, como recomendación es conveniente el empleo de varios observadores expectantes a indicios de falla durante y después de la culminación de la prueba. La aplicación del voltaje de prueba se hace de diversas formas: directamente la totalidad del voltaje pleno de la prueba, de forma gradual (forma de rampa) y por pasos o escalonada (forma discreta), de cualquier forma debe

asegurarse que el tope para el voltaje de prueba sea aplicado en un intervalo de tiempo suficiente.

Durante la ejecución de la prueba de alto potencial directo, se registra la respuesta de la corriente de fuga a medida que se aplica el voltaje y, para un mejor análisis se grafica la corriente de fuga contra el voltaje de prueba aplicado; cuando se presentan anomalías o desviaciones en dicho comportamiento pueden ser indicios de posibles daños en el aislamiento. El seguimiento de la traza apoyará la decisión de suspender la prueba, para prevenir posibles daños mayores que pueden ocasionarse.

Uno de los fines principales de la prueba de alto potencial es el de identificar y localizar la falla para efectuar el reemplazo o la reparación, para esto la norma recomienda varios métodos que tratan de hacer visible la parte fallada de la máquina; pero si la falla no se encuentra con facilidad, puede recurrirse a fraccionar el devanado y sucesivamente ir probando hasta encontrar la porción o las bobinas falladas. Por último se sugieren algunos ítems muy importantes para tener en cuenta en el diligenciamiento del formato de registro de la prueba de alto potencial, debido a su trascendencia y empleo en las empresas del sector energético se mencionan las siguientes:

- Tipo de aislamiento, en especial el material que lo conforma
- Diagrama de conexión
- Tiempo fuera de servicio
- Razón por la cual se ejecuta la prueba
- Diagnóstico de la inspección visual anterior y posterior a la prueba
- Resultados de la prueba y acciones tomadas para el mantenimiento y operación de la máquina

7.6 IEEE Std. 112-2004

“IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators”

La norma presenta instrucciones para la ejecución de las pruebas aplicadas a las máquinas rotativas, entre las que se mencionan la prueba sin carga (prueba en vacío) y de rotor bloqueado que son útiles en la determinación de los parámetros del modelo del motor de inducción. Además, dedica secciones a temas importantes como son las pérdidas y la eficiencia de las máquinas rotativas.

En la prueba de rotor bloqueado se involucran esfuerzos mecánicos y térmicos bastante considerables que pueden averiar la máquina sino ésta no se ejecuta adecuadamente, por lo tanto deben tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

- Antes de ejecutar la prueba debe establecerse la dirección de la rotación.
- Verificar que los medios mecánicos empleados para el bloqueo estén en óptimas condiciones para evitar daños al personal y al equipo.
- La máquina debe estar aproximadamente a temperatura ambiente antes del inicio de la prueba.
- Las medidas de corriente se tomarán lo más rápido posible, para obtener valores representativos, la temperatura de la máquina no debe exceder la nominal más un incremento de 40 °C. La lectura para cualquier punto será tomada dentro de los cinco segundos después de haber aplicado el voltaje.

La norma hace unas recomendaciones básicas para la toma de lecturas de los valores nominales de la máquina como son: el voltaje, corriente y potencia entre otros. Hace hincapié en la utilización de instrumentos que pueden ser análogos o

digitales, se encuentren calibrados y que cumplan con las especificaciones necesarias realizar una buena medida.

Para ejecutar la medida de resistencia de los bobinados del estator se hace referencia a los estándares IEEE Std. 118-1978, "IEEE Standard Test Code for Resistance Measurement" and IEEE Std. 119-1974, "IEEE Recommended Practice for General Principles of temperature Measurement as Applied to Electrical Apparatus". Para culminar, una de las secciones se dedica a la presentación de pruebas misceláneas, dentro de las cuales puede mencionarse la relacionada con la resistencia de aislamiento en los rodamientos.

7.7 IEEE Std. 56-1997

"IEEE Guide for Insulation Maintenance of Large Alternating-Current Rotating Machinery (10 000 kVA and Larger)"

Uno de los propósitos generales de esta norma que tiene que ver con el mantenimiento de máquinas rotativas es la presentación de la información de inspecciones y pruebas necesarias para una efectiva evaluación del sistema de aislamiento.

En uno de sus apartados se habla de las partes de la máquina que se encuentran aisladas eléctricamente, para mantener siempre dicha característica es necesario que se ejecuten actividades de limpieza relacionadas con el mantenimiento. El término "limpieza" se refiere a: limpieza, lavado, secado, impregnación o barnizado, es decir que sin distinción pueden realizarse una sola, parte de ellas o la totalidad de las mismas.

Dedica una parte muy importante a las inspecciones que se realizan sobre las máquinas rotativas, éstas son tenidas en cuenta por el encargado de mantenimiento como apoyo para el diagnóstico de la condición previa a la intervención o a la reparación de la unidad. En uno de los apartados muestra

algunas de las técnicas más empleadas en las labores de limpieza del aislamiento eléctrico y recalca que una excesiva e imprudente limpieza puede llegar a ser más dañina que la no ejecución de dicha labor, para esto conviene que se realice con los materiales adecuados y que no sean muy abrasivos y químicamente reactivos; además, deben considerarse las medidas de seguridad para el personal cuando se apliquen solventes y otros materiales altamente perjudiciales para la salud.

Esta norma puede complementarse con las actividades que se recomiendan en la IEEE Std. 112-2004, para tener un completo repertorio de las pruebas empleadas en el diagnóstico de la condición previa al mantenimiento y las que posteriormente se ejecutan para evaluar la intervención realizada sobre la máquina. Como referencia y complemento de las normas presentadas, se tienen:

IEEE Std. 432-1992, "IEEE Guide for Insulation Maintenance for Rotating Electric Machinery (5 hp to less than 10 000 hp)". Complementa la IEEE Std. 56-1997, en especial la sección de inspecciones previas para determinar la zona afectada por la falla. Dedicar un apartado a la prueba para el aislamiento presente en las láminas que conforman el núcleo de la máquina.

IEEE Std. 1068-1996, "IEEE Recommended Practice for the Repair and Rewinding of Motors for Petroleum and Chemical Industry". Presenta los métodos empleados para la ejecución de la prueba de aislamiento interlaminar. Tiene en cuenta la inspección general que se realiza a la maquinaria rotativa, resaltando las partes mecánicas sujetas a dicha práctica.

8 CONCLUSIONES

Se concluye a partir de lo expuesto en el trabajo que:

- Muchas de las acciones de mantenimiento están condicionadas por criterios técnicos, ambientales, económicos o una combinación de éstos, por lo general las políticas de la empresa reflejan de una u otra forma dichos aspectos, debido a esto el RCM debe ser flexible para que pueda acomodarse a cada una de las expectativas y metas corporativas.
- En el mejor de los casos es conveniente que se adopten actividades basadas en el tiempo, en la condición y en la oportunidad, pues de la mezcla adecuada de éstas depende el éxito que pueda lograrse con el programa RCM; aunque no se defina propiamente el modelo de gestión de mantenimiento, algunas de las estrategias que conforman el RCM se emplean de manera implícita.
- Gran parte de los componentes mecánicos se diseñan estratégicamente para que se desgasten por el uso de manera que otras piezas críticas no reciban el daño directamente, aprovechando dicho factor, el encargado de mantenimiento tomará las acciones pertinentes que prevean o eviten que se presente una falla funcional que requiera un mayor esfuerzo y costo de reparación.
- En la medida en que los costos sean más asequibles deben acogerse las técnicas en las que primen las pruebas e inspecciones realizadas en servicio, ya que con esto pueden mejorarse notablemente los indicadores relacionados con la disponibilidad y la confiabilidad del equipo o sistema.

- En la mayoría de los motores de inducción la atención principalmente debe centrarse en los rodamientos, debido a que es uno de los componentes que más presenta variaciones en cuanto a su fabricación, operación y mantenimiento, y, además es una de las partes que más fallas funcionales genera en las máquinas rotativas.
- En la elaboración e implementación del sistema de gestión de mantenimiento centrado en la confiabilidad, deben tenerse presente aspectos como: las políticas de la empresa, el tiempo de posicionamiento del programa, los recursos económicos, las lecciones aprendidas y los estudios de “benchmarking” con empresas del sector productivo, ya que de éstos depende el éxito del programa.
- Tanto las acciones de mantenimiento como las de operación deben correlacionarse mutuamente, ya que algunos de los problemas que se presentan en las empresas se debe a la falencia de este hecho; debido a que se desvirtúan cada uno de los procesos y de esta forma no se logra alcanzar las metas propuestas por el gerenciamiento estratégico del negocio.
- En la elaboración de los indicadores que evalúan la gestión del mantenimiento deben definirse rangos donde sean perceptibles efectos cualitativos como la pérdida del prestigio de la imagen corporativa, y los impactos sociales, culturales y ambientales, pues solo de esta forma pueden controlarse y mejorarse dichos aspectos.
- El programa de mantenimiento centrado en la confiabilidad es un proceso dinámico, iterativo, que demanda tiempo y esfuerzo para la consecución de resultados; por eso es recomendable para empresas de alto impacto, donde el mantenimiento juega un papel importante en el cumplimiento de los estándares de calidad y servicio.

9 RECOMENDACIONES

Gracias a la experiencia adquirida en las empresas del sector energético durante el proceso de práctica y en el desarrollo de investigación del trabajo de grado, el autor recomienda a la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander:

- Realizar proyectos conjuntos con carreras como ingeniería mecánica e industrial, donde puedan desarrollarse nuevas tecnologías que apunten hacia el mejoramiento del mantenimiento en el campo técnico, administrativo y económico.
- Fomentar los intercambios de conocimiento que se logran con la experiencia de prácticas empresariales por parte de los estudiantes, porque de ésta forma logran establecerse convenios que terminan favoreciendo a las dos partes involucradas en el proceso académico y productivo.
- Contribuir con el apoyo para la realización de trabajos de grado orientados al área de mantenimiento, proponiendo investigaciones en campos como los sistemas de distribución y transmisión, sistemas de generación y temas que pronto tendrán cabida en el ámbito energético nacional como son el empleo de sistemas de alta tensión en corriente continua.
- Aprovechar los laboratorios y el personal con que cuenta la facultad de ingenierías para ofrecer servicios como: programas de capacitación, ejecución de pruebas, consultorías y estudios de investigación que enriquezcan las actividades que conforman las estrategias de mantenimiento empleadas por las empresas del sector energético y productivo del país.

BIBLIOGRAFÍA

1. LIWSCHITZ-GARIK, Michael. Máquinas de corriente alterna. Compañía editorial continental S.A., México 1970.
2. JONES, David; JOWERR, Jeffrey; THOMSON, Graeme; DANNER, David; Guía para pruebas de diagnóstico de aislamiento (Megger). Segunda edición 2002.
3. SOLANO MARTÍNEZ, Javier Enrique. Mantenimiento de Transformadores de Potencia. Tesis (Ingeniero Electricista). Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2005.
4. RODRÍGUEZ, José. Sistemas Electromecánicos de la Universidad Técnica Federico Santa María. Chile, 1999.
5. DOUGLASS, Johnny de la Washington State University, Motor Repair Tech Brief.
6. La guía completa para pruebas de aislamiento eléctrico de la AVO INTERNATIONAL. Tercera edición 1992. Dallas, Texas.
7. THOMAS, Timothy de Baker Instrument Company. On-Line and Off-Line Testing of Electrical Motors.
8. HIDALGO, Juan del grupo TERMOGRAM. Análisis de las zonas de falla de motores eléctricos. Costa Rica.
9. AC Motors Repair Specification, NWIBRT, 1999.
10. OKRASA, Richard. Preventive Maintenance. Segunda edición 1997. Ontario Canadá.
11. Termografía Infrarroja para Mantenimiento Predictivo y Preventivo. FLIR Systems.
12. Instrucciones para motores de inducción horizontales Custom 8000, General Electric Company, USA 1999.
13. Frequency of Maintenance Tests. International Electrical Testing Association. 2001.

14. MICHALEC, James. A Proposed Motor Predictive Maintenance Program. American Electric Power, 2001.
15. Maintenance of Mechanical and Electrical Equipment at Command, Control Communications, Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance Facilities. Department of the Army. Washington, 2001.
16. EASA Std. AR100-2001, Recommended Practice for the Repair of Rotating Electrical Apparatus. St. Louis, 2003.
17. IEEE Std. 43-2000, IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery.
18. IEEE Std. 95-2002, IEEE Recommended Practice for Insulation Testing of AC Electric Machinery (2300 V and Above) With High Direct Voltage.
19. IEEE Std. 112-2004, IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators.
20. IEEE Guide for Insulation Maintenance of Large Alternating-Current Rotating Machinery (10000 kVA and Larger), IEEE Std. 56-1997.
21. IEEE Std. 432-1992, IEEE Guide for Insulation Maintenance for Rotating Electric Machinery (5 hp to less than 10000 hp).
22. IEEE Std. 1068-1996, IEEE Recommended Practice for the Repair and Rewinding of Motors for Petroleum and Chemical Industry.
23. Reliability Centered Maintenance Guide for Facilities and Collateral Equipment. NASA. 2000.
24. Acceptance Testing Specifications for Electric Power Distribution Equipment and Systems. NETA. 1999.
25. Field Commissioning and Maintenance of Electrical Installations and Equipment Design and Engineering Practice. SHELL. 2000.
26. NFPA 70B, Recommended Practice for Electrical Equipment Maintenance. 2002 Edition.
27. DOE-HDBK-1011/4 Electrical Science, U.S. Department of Energy. Washington, 1992.
28. DOE-STD-1052-93, Guideline to Good Practices for Types of Maintenance Activities at DOE Nuclear Facilities. U.S. Department of Energy. Washington. 1993.

ANEXOS

ANEXO A. Carta de soluciones a problemas en el motor de inducción¹

Problema	Posible causa	Acción recomendada
Motor no arranca	Energía no conectada	Conectar energía al control del motor. Verificar los contactos.
	Bajo voltaje	Verificar valor de placa con la medida de voltaje de alimentación.
	Conexiones de control incorrectas	Verificar con el diagrama del sistema de control.
	Máquina accionada bloqueada	Desacoplar la carga del motor. Si el motor arranca satisfactoriamente, el problema se encuentra en la máquina accionada.
	Circuito abierto en el rotor o devanado del estator	Medir y comparar la resistencia de aislamiento de cada fase.
	Devanado con contacto a tierra	Pruebas de devanado contra tierra.
	Par de carga excesivo	Medir las corrientes por las fases. Reducir carga de forma conveniente.
Ruido o vibración	Interrupción por controles de sobrecarga	Esperar que el motor se enfríe. Intentar arrancar de nuevo. Cuando se emplee un arranque estrella-triángulo, esperar un tiempo prudente para que la carga enganche adecuadamente y no se disparen las protecciones.
	Motor trabajando monofásico	Verificar condición abierta en una de las líneas del circuito. Parar el motor y eliminar la condición de falla.
	Fases de la fuente de energía desbalanceada	Verificar balanceo por medición de corriente y voltaje en cada fase. Corregir la fuente de alimentación para obtener voltajes balanceados.
	Desalineamiento	Verificar alineamiento paralelo, angular y axial.
	Entrehierro no uniforme	Centrar el rotor.
	Rodamiento de bolas ruidoso	Verificar lubricación. Sustituir cojinetes si el ruido es persistente y excesivo.
	Fundación suelta	Realignar la máquina. Reapretar los pernos de fijación.
Sobrecalentamiento	Material extraño dentro de la unidad	Limpiar el interior de la unidad.
	Sobrecargado	Medir carga con amperímetro y comparar con corriente de plena carga. Identifique si es una condición transitoria del proceso. Reducir carga de forma conveniente.
	Desbalance de carga eléctrica	Verificar desbalance de voltaje o posible operación monofásica.
	Ventilación restringida	Limpiar filtros, pasajes de aire y devanados.

¹ Basado en: Motores de Inducción Horizontales Custom 8000 de General Electric Company y Motor Trouble-Shooting Chart de Leeson Electric Corporation.

Problema	Posible causa	Acción recomendada
Sobrecalentamiento (cont.)	Voltaje y frecuencia incorrectos	Verificar valores de placa con la fuente de energía. Verificar voltaje en los terminales con la máquina a plena carga.
	Devanado estator en cortocircuito (línea a línea)	Inspeccionar devanado en búsqueda de daños. Obtener ayuda de especialista en reparación.
	Devanado estator a tierra (línea a tierra)	Inspeccionar devanado en búsqueda de daños. Obtener ayuda de especialista en reparación.
Sobrecalentamiento de cojinetes (tipo chumacera)	Velocidad incorrecta	Verificar y comparar la velocidad con el valor de placa.
	Alineamiento	Verificar alineamiento paralelo, angular y axial. Corregir conforme sea necesario.
	Aceite insuficiente	Si el nivel de aceite esta muy bajo, drenar, lavar con aceite limpio y adicionar aceite.
	Contaminación en el aceite o grado de aceite impropio	Drenar el aceite. Lavar con aceite limpio y lubricar usando aceite con la viscosidad indicada por el fabricante.
	Anillos de aceite girando muy despacio o no girando del todo	Si el anillo de aceite tiene señales de desgaste, sustituya por anillo nuevo.
	Anillos torcidos o dañados en el montaje	Sustituir anillos de aceite.
	Sellos de aceite pegados o dañados	Sustituir los sellos.
Cojinetes ruidosos o vibrando (tipo bolas, rodillos)	Cojinetes defectuosos o eje áspero	Sustituir cojinetes o maquinar superficie del eje.
	Grado incorrecto de grasa	Remover el "plug" y reengrasar el cojinete. Colocar el "plug" después de media hora de trabajo.
	Exceso de grasa	Remover el "plug" de drenaje y dejar el motor trabajar hasta que el exceso de grasa haya salido. Entonces nuevamente instale el "plug".
	Cojinete defectuoso o dañado	Sustituir el cojinete.
	Material extraño en la grasa	Remover el "plug" de drenaje. Retirar la grasa contaminada del cojinete. Relubricar hasta que solamente la grasa limpia este salga por el "plug".
Baja resistencia de aislamiento o falla de aislamiento	Humedad	Secar el devanado.
	Suciedad	Limpia el devanado.
	Partículas conductoras penetraron el aislamiento	Obtener ayuda de especialista en la reparación.
	Daños mecánicos al aislamiento	Obtener ayuda de especialista en la reparación.
	Temperaturas excesivas	Obtener ayuda de especialista en la reparación.

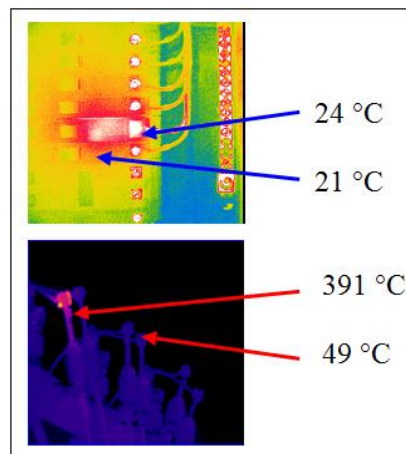
ANEXO B. Qué debe tener en cuenta un buen termógrafo

Existen algunas variables que pueden afectar los resultados obtenidos de una inspección termográfica y que como tal un buen termógrafo debe tener en cuenta.

- **Medición de temperatura**

El termógrafo debe ajustar adecuadamente la paleta o escala de colores pues en dado caso una pequeña variación de temperatura puede verse como una condición crítica o por el contrario una verdadera falla puede pasarse desapercibida.

Figura 26. Diferencias de temperatura en los termogramas



Fuente: Plan de mantenimiento predictivo con termografía infrarroja, ECOPETROL S.A.

- **Entorno**

Es la variable que más puede afectar los resultados de una inspección termográfica, a continuación se presentan los aspectos del entorno que el termógrafo debe tener en cuenta al momento de realizar la toma: temperatura ambiente, velocidad del viento, parámetros de funcionamiento del equipo, presencia de superficies reflectivas en el área de observación y carga solar.

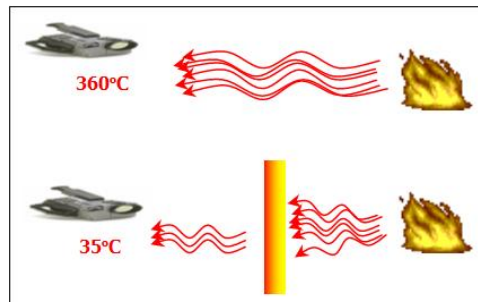
- **Emisividad**

Si la emisividad ingresada a la cámara corresponde a la de la superficie en observación, la temperatura registrada por ésta será la misma de la zona bajo inspección, pero si el valor de emisividad adoptado es erróneo o muy alejado del real, esto puede alterar los resultados de forma considerable.

- **Medición directa e indirecta**

En la medición directa se observa directamente el objeto, al contrario de la indirecta, ya que existe una superficie entre la cámara termográfica y el objeto de interés.

Figura 27. Medición directa e indirecta en termografía



Fuente: Plan de mantenimiento predictivo con termografía infrarroja, ECOPEPETROL S.A.

Cuando se mide indirectamente lo más importante es tener en cuenta que cuando se registran pequeñas variaciones de temperatura pueden ser indicios de problemas severos en la parte interna del equipo.

- **Enfoque**

Tiene que ver con el buen manejo de la cámara. Ocurre frecuentemente que a pesar de haber detectado “puntos calientes”, no es posible hacer el correctivo pertinente debido a que la imagen no permite visualizar con claridad cuál es la parte exacta del equipo donde se presenta la falla.

- **Distancia al objeto / tamaño**

Muchos equipos a los que se les hace inspección termográfica son de difícil acceso o están a una distancia considerable del punto de observación. En ese sentido la máxima distancia a la que se recomienda hacer una inspección termográfica es de 3 m. Lo ideal es tomar la termografía a una distancia prudente en lo posible no superior a 2 m.

Por otra parte cuando se va a inspeccionar un objeto muy pequeño, se recomienda hacerlo lo más cerca posible al objeto, pero teniendo cuidado de no poner en riesgo la integridad física del termógrafo. Se recomiendan las distancias mínimas de seguridad de la OSHA¹.

Tabla 15. Distancias de seguridad en termografía recomendadas por la OSHA.

Voltaje	Distancia mínima de seguridad (m)
300 V - 750 V	1
750 V - 2 kV	1,2
2 kV - 15 kV	5
15 kV - 36 kV	5,8

Fuente: Plan de mantenimiento predictivo con termografía infrarroja, ECOPELROL S.A.

- **Registros**

Para valorar adecuadamente un posible “punto caliente” es necesario contar con una buena base de registros de termogramas del equipo o la parte del mismo que está siendo inspeccionada, ya que esto puede facilitar la interpretación y la forma de actuar más conveniente ante dicha anomalía.

¹ OSHA: Occupational Safety and Health Administration.

ANEXO C. Recomendaciones de seguridad en el trabajo eléctrico

Dentro de cada una de las actividades que requieran intervención e inspección de equipo eléctrico existe un riesgo inherente que debe administrarse de la forma más conveniente, ya que de lo contrario pueden llegarse a presentar situaciones donde se afecte la integridad de los equipos y la seguridad del personal asociado.

Se debe tener especial cuidado cuando se vayan a realizar trabajos con tensión, por eso es necesario elaborar y seguir un correspondiente protocolo de normas de seguridad para cada una de las maniobras o actividades presentes. Aunque generalmente muchas de las acciones sobre los motores de inducción se realizan en un estado desenergizado, por ésta razón deben seguirse las recomendaciones mínimas para tareas ejecutadas en ausencia de tensión eléctrica.

Antes de iniciar cualquier labor deben conocerse muy bien las implicaciones que tienen para el equipo, el personal y el ambiente la ejecución de dicha actividad. Además de esto, es necesario establecer los roles de cada uno de los participantes en la ejecución de la maniobra. A continuación se mencionan algunas de las recomendaciones que deben tenerse en cuenta para el manejo de equipo eléctrico.

- Antes de iniciar un trabajo en equipos o componentes del sistema eléctrico que implique alto nivel de criticidad en el proceso productivo o alguna maniobra de alto impacto, debe contarse con los equipos de comunicación oficialmente autorizados, verificando su adecuado funcionamiento.
- Delimitar la zona de trabajo por medio de señales visuales como cintas, conos o pedestales informativos.

- La intervención a equipos y/o componentes del sistema eléctrico debe realizarse por personal competente para el tipo de actividad a realizar, éste debe tener permiso de la autoridad eléctrica.
- Todo trabajo que se vaya a ejecutar en instalaciones eléctricas o en sus proximidades, debe contar previamente con la identificación, evaluación y el análisis de los riesgos asociados.
- En cuanto a las señales de seguridad y de acuerdo a la función que cumplen deben transmitir mensajes de: prevención, prohibición e información, éstos deben ser claros, precisos y de fácil entendimiento para todos. En la siguiente tabla se presentan los colores de las señales y su significado.

Tabla 16. Colores de las señales y su significado

Fondo	Significado	Información
Rojo	Pare, prohibición, prevención y protección contra incendios.	Blanco
Amarillo	Precaución, peligro.	Negro
Verde	Condición de seguridad.	Blanco
Azul	Acción de mando.	Blanco

Fuente: Concejo Colombiano de Seguridad.

- Antes de iniciar un trabajo en equipos o componentes del sistema eléctrico deben aplicarse las siguientes reglas de oro: verificar el estado de los accesorios y herramientas; desenergizar el circuito; verificar ausencia de tensión; verificar a través de inspección visual la apertura de interruptores o fusibles, colocar a tierra los circuitos correspondientes y aislar eléctricamente el equipo o componente a intervenir.
- La máquina debe ser bloqueada y tarjetada antes de iniciar los trabajos y convenientemente protegida contra reenergización involuntaria.

- Emplear los elementos de protección personal como gafas, guantes, botas y protección respiratoria, en especial cuando se trabaja con solventes. Además será necesario que cuente con los accesorios de seguridad para sitios catalogados de alto riesgo.
- Tener gran cuidado en la selección de los agentes de limpieza para cada tarea en particular, además de las regulaciones ambientales vigentes para cada país.
- Proporcionar una ventilación adecuada para evitar el fuego, explosiones, y peligros para la salud cuando se utilizan agentes para la limpieza.
- Al realizar las pruebas, algunas partes del equipo pueden quedar cargadas, éstas deben descargarse adecuadamente antes de ser manipuladas.
- La realización de trabajos al aire libre o en instalaciones interiores con conexión a líneas aéreas, deberán tenerse en cuenta las posibles condiciones ambientales desfavorables, de forma que el trabajador, los equipos y los procesos productivos queden protegidos en todo momento. Los trabajos se prohibirán o suspenderán en caso de tormenta, lluvia o vientos fuertes o cualquier otra circunstancia que dificulte la ejecución adecuada de dicha actividad.
- Antes de poner nuevamente en servicio un equipo eléctrico debe contarse con la autorización del personal competente para emitir la correspondiente orden.
- También es recomendable que en lo posible las órdenes provengan de una sola persona encargada, ya que esto asegura que no se presenten errores o ambigüedades en los mensajes de comunicación.

- Otra cosa que facilita el alcance de una buena intervención radica en el hecho de seguir tareas de forma consecutivas, es decir, que no se prosiga a la siguiente actividad sin haber concluido la precedente.
- Siempre debe tenerse en cuenta que las intervenciones en los equipos terminan solamente cuando se ha puesto nuevamente en servicio y la autoridad eléctrica o de proceso ha cerrado de forma satisfactoria la orden de trabajo.
- Todos los equipos, herramientas y accesorios utilizados para intervenir el sistema eléctrico deben incluirse en un programa de pruebas e inspecciones adecuado a los requerimientos de seguridad.

ANEXO D. Protocolo de inspección del motor de inducción

PROTOCOLO DE INSPECCIÓN DEL MOTOR DE INDUCCIÓN																																							
Localización:	Fabricante:	Proceso:	Tensión:																																				
Motor No.:	Serial No.:	Potencia:	Velocidad:																																				
1. Diligenció la hoja de registro del motor		2. Inspeccionó la unidad de control del motor																																					
3. Prueba de Resistencia de Aislamiento Voltaje de prueba: ■ Resistencia de aislamiento del cable del motor (Fase contra tierra) L1-G: L2-G: L3-G: ■ Resistencia de aislamiento del motor (Fases contra tierra) Después del minuto: Después de 10 minutos: Índice de Polarización: ■ Verificó la conexión del cable ■ Resistencia de aislamiento del motor + cable (Fases contra tierra): ■ Resistencia de aislamiento de la unidad de control + cable contra tierra:																																							
4. Aterrizamiento ■ Verificó la condición de conexiones del aterrizamiento Motor: Unidad de control: ■ Continuidad del sistema de aterrizamiento en buenas condiciones																																							
5. Ítems especiales ■ Verificó la ausencia de condensación con los calentadores de espacio encendidos ■ Prueba de resistencia de aislamiento para el calentador de espacio ■ Prueba de resistencia de aislamiento para los detectores de temperatura ■ Inspeccionó los sistemas auxiliares ■ Prueba de aislamiento a los rodamientos ■ Verificó la excentricidad del motor																																							
6. Inspección básica ■ Información de placa conforme con la de los registros ■ Encerramiento en buenas condiciones ■ Sellos y empaquetaduras en buenas condiciones ■ Pernos y enclavamiento bien apretados ■ Limpieza general del motor ■ Equipo libre de fugas de lubricante ■ Adecuada protección del equipo y cables contra corrosión, tiempo, vibraciones y otros factores adversos ■ Verificó el buen funcionamiento del sistema de ventilación ■ Nivel adecuado de lubricante ■ Bloqueos en óptimas condiciones ■ Pintura general en buen estado																																							
7. Mida/Registre los siguientes ítems en condición de desacople Confirmó la correcta dirección de rotación del eje Niveles de vibración aceptables Corriente de arranque: Corriente de vacío: Registre temperaturas de los rodamientos <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <thead> <tr> <th style="width: 20%;">Temperatura</th> <th style="width: 10%;">0 min.</th> <th style="width: 10%;">20 min.</th> <th style="width: 10%;">40 min.</th> <th style="width: 10%;">60 min.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Caja rodamiento</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Rodamiento</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Ambiente</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				Temperatura	0 min.	20 min.	40 min.	60 min.	Caja rodamiento					Rodamiento					Ambiente																				
Temperatura	0 min.	20 min.	40 min.	60 min.																																			
Caja rodamiento																																							
Rodamiento																																							
Ambiente																																							
8. Mida/Registre los siguientes ítems en condición de plena carga Niveles de vibración aceptables Registre temperaturas de los rodamientos <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <thead> <tr> <th style="width: 12.5%;">Temperatura</th> <th style="width: 10%;">0 min.</th> <th style="width: 10%;">30 min.</th> <th style="width: 10%;">60 min.</th> <th style="width: 10%;">90 min.</th> <th style="width: 10%;">120 min.</th> <th style="width: 10%;">150 min.</th> <th style="width: 10%;">180 min.</th> <th style="width: 10%;">210 min.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Caja rodamiento</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Rodamiento</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Ambiente</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				Temperatura	0 min.	30 min.	60 min.	90 min.	120 min.	150 min.	180 min.	210 min.	Caja rodamiento									Rodamiento									Ambiente								
Temperatura	0 min.	30 min.	60 min.	90 min.	120 min.	150 min.	180 min.	210 min.																															
Caja rodamiento																																							
Rodamiento																																							
Ambiente																																							
9. Comentarios:																																							
10. Equipo apto para operación:																																							
Firma:	Fecha:	Firma:	Fecha:																																				