

**CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE UN PLAN DE  
MANTENIMIENTO PARA MOTORES TRIFÁSICOS  
ASÍNCRONOS APLICANDO EL MÉTODO DE ANÁLISIS  
MODAL DE FALLOS Y EFECTOS (AMFE).**

**LUDWING DARÍO MUÑOZ CABALLERO**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECAICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2013**

**CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE UN PLAN DE  
MANTENIMIENTO PARA MOTORES TRIFÁSICOS  
ASÍNCRONOS APLICANDO EL MÉTODO DE ANÁLISIS  
MODAL DE FALLOS Y EFECTOS (AMFE).**

**LUDWING DARÍO MUÑOZ CABALLERO**

Trabajo de tesis para optar por el título de ingeniero electrónico

**Director:**

Profesor Julio Augusto Gélvez F



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2013**

## **DEDICATORIA**

*A Dios por la vida, la salud y todas las capacidades con que me bendice cada día y que me permitieron alcanzar esta meta.*

*A mis padres Germán y María Isabel por su amor incondicional, por sus sabios consejos, por creer en mí y por apoyarme siempre, tanto económica como moralmente.*

*A mis hermanos Leandro, Steven y Simón por su compañía y cariño día a día.*

*Al profesor Julio Gévez, por su dirección, sugerencias y aportes, que fueron muy importantes para la culminación exitosa de este trabajo.*

*Y a todas aquellas personas que de alguna u otra manera han aportado a mi desarrollo personal, espiritual y profesional.*

***Ludwing Darío Muñoz Caballero***

# CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>15</b>
<b>1. MARCO CONCEPTUAL .....</b>	<b>17</b>
1.1. MANTENIMIENTO Y CONFIABILIDAD OPERACIONAL .....	17
1.2. HERRAMIENTAS DE CONFIABILIDAD OPERACIONAL .....	18
1.3. TEORÍA Y EVOLUCIÓN DEL MANTENIMIENTO .....	19
1.4. MOTORES ELÉCTRICOS ASÍNCRONOS O DE INDUCCIÓN .....	21
<b>2. ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS, AMFE .....</b>	<b>23</b>
2.1. CÓMO DEFINIR LAS FUNCIONES.....	29
2.2. ESTÁNDARES DE FUNCIONAMIENTO .....	29
2.3. CONTEXTO OPERACIONAL .....	30
2.4. FALLAS FUNCIONALES .....	30
2.5. MODOS DE FALLA .....	31
2.6. EFECTOS DE FALLA .....	37
2.7. CAUSAS DE FALLA .....	39
2.8. DETERMINAR ÍNDICES DE EVALUACIÓN.....	40
2.9. CALCULAR EL NPR PARA CADA MODO DE FALLO POTENCIAL.....	43
2.10. PROPONER ACCIONES CORRECTIVAS O DE MEJORA .....	44
2.11. REVISAR EL AMFE.....	44
2.12. INTERPRETACIÓN .....	44
<b>3. ANÁLISIS DE LAS POSIBLES ZONAS DE FALLA DE UN MOTOR ELÉCTRICO TRIFÁSICO ASÍNCRONO.....</b>	<b>46</b>
3.1. CIRCUITO DE POTENCIA .....	47
3.2. CALIDAD DE ENERGÍA .....	48
3.3. DESBALANCE DE VOLTAJE.....	48
3.4. EFECTO CORONA.....	49
3.5. ARMÓNICOS.....	50
3.6. AISLAMIENTO.....	51
3.7. SOBRETENSIONES.....	52
3.8. ESTATOR.....	53
3.9. ROTOR.....	56

<b>4. TAREAS DE MANTENIMIENTO PARA MOTORES ELÉCTRICOS TRIFÁSICOS ASÍNCRONOS .....</b>	<b>62</b>
4.1. INSPECCIÓN CON LOS SENTIDOS Y LIMPIEZA.....	62
4.2. MANTENIMIENTO DE LOS DEVANADOS DEL ROTOR Y DEL ESTATOR .....	64
4.3. LUBRICACIÓN DE RODAMIENTOS.....	66
4.4. ANÁLISIS DE LOS NIVELES DE RUIDO Y VIBRACIONES .....	67
4.5. ANÁLISIS DE LAS CORRIENTES Y TENSIONES EN EL EQUIPO .....	68
4.6. SUSTITUCIÓN DE RODAMIENTOS .....	69
4.7. TAREAS DE MANTENIMIENTO PARA MOTORES DE ROTOR DEVANADO .....	69
4.8. MANTENIMIENTO CORRECTIVO .....	71
<b>5. TÉCNICAS DE MANTENIMIENTO BASADO EN LA CONDICIÓN, CBM .....</b>	<b>72</b>
5.1. TERMOGRAFÍA.....	72
5.2. ULTRASONIDO .....	86
5.3. ANÁLISIS DE VIBRACIONES .....	93
5.4. MCSA (MOTOR CURRENT SIGNATURE ANALYSIS) .....	103
<b>6. CONCLUSIONES .....</b>	<b>108</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>110</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>116</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO AMFE. ....	26
FIGURA 2. DESBALANCE RESISTIVO – FALSO CONTACTO SEVERO. ....	48
<b>FIGURA 3. FACTOR DE REDUCCIÓN DE POTENCIA (NEMA). ....</b>	<b>49</b>
FIGURA 4. ROTOR EN BUEN ESTADO SEGÚN RIC. ....	57
FIGURA 5. ROTOR CON BARRAS ROTAS SEGÚN RIC. ....	58
FIGURA 6. EXCENRICIDAD ESTÁTICA. ....	60
FIGURA 7. EXCENRICIDAD DINÁMICA. ....	61
FIGURA 8. DIAGRAMA PARA LA PRUEBA DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO. ....	65
FIGURA 9. DISTANCIA ENTRE PORTA ESCOBAS Y LA SUPERFICIE DEL CONTACTO. ....	71
FIGURA 10. EJEMPLO DE APLICACIÓN DE TERMOGRAFÍA A UN MOTOR DE AC. ....	73
FIGURA 11. EJEMPLO DE GRADIENTE TÉRMICO EN UN MOTOR ELÉCTRICO. ....	77
FIGURA 12. EJEMPLO DE AJUSTE TÉRMICO EN UN INTERRUPTOR DE ALTA TENSIÓN. ....	78
FIGURA 13. EJEMPLOS DE PALETAS DE COLORES. ....	79
FIGURA 14. EJEMPLO DE PERFIL DE TEMPERATURA A LO LARGO DE UN GRUPO DE ELEMENTOS. ....	80
FIGURA 15. TERMOGRAMA DE UNA HABITACIÓN CON PRESENCIA DE HUMEDAD. ....	81
FIGURA 16. TERMOGRAMA DE UN MOTOR ELÉCTRICO. ....	81
FIGURA 17. TERMOGRAMA COMPARATIVO. ....	83
FIGURA 18. EJEMPLO DE APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE VIBRACIONES A UN RODAMIENTO DEFECTUOSO. ....	94
FIGURA 19. CAMBIOS RELATIVOS AL ESPECTRO DE REFERENCIA. ....	98
FIGURA 20. ESPECTRO DE LAS VIBRACIONES EN UN MOTOR DE 1740 RPM CON CORTOCIRCUITO EN ALGUNAS ESPIRAS DE SUS POLOS. ....	100
FIGURA 21. DESPIECE DE UN RODAMIENTO DE BOLAS. ....	101
FIGURA 22. ESPECTRO DE LA CORRIENTE DE UN MOTOR EN BUEN ESTADO. ....	105
FIGURA 23. ESPECTRO DE LA CORRIENTE DE UN MOTOR AVERIADO. ....	106
FIGURA 24. MANTENIMIENTO PROGRAMADO – PREVENTIVO. ....	118
FIGURA 25. NATURALEZA DE LOS TIPOS DE MANTENIMIENTO. ....	120
FIGURA 26. EJEMPLO DE APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE VIBRACIONES. ....	122
FIGURA 27. CATEGORÍAS DE ERRORES PSICOLÓGICOS. ....	126

## LISTA DE TABLAS

TABLA 1. EJEMPLO DE MODOS DE FALLA PARA UNA BOMBA. ....	32
TABLA 2. DESCRIPCIÓN DE LOS MODOS DE FALLA PARA UNA BOMBA. ....	35
TABLA 3. EJEMPLO DE UNA HOJA DE INFORMACIÓN DE UN AMFE. ....	39
TABLA 4. TABLA DE OCURRENCIA DEL MODO DE FALLO. ....	40
TABLA 5. TABLA DE GRAVEDAD DEL MODO DE FALLO. ....	41
TABLA 6. CLASIFICACIÓN DE LA FACILIDAD DE DETECCIÓN DEL MODO DE FALLO. ....	42
TABLA 7. EJEMPLO DEL CÁLCULO DE LOS ÍNDICES PARA UN AMFE. ....	43
TABLA 8. CLASIFICACIÓN DE ARMÓNICOS EN UN SISTEMA TRIFÁSICO. ....	51
TABLA 9. EJEMPLO DE CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN DE FALLOS. ....	83
TABLA 10. IMPORTANCIA DEL ULTRASONIDO PARA EL MANTENIMIENTO. ....	92
TABLA 11. CRITERIOS DE SEVERIDAD DE LAS VIBRACIONES ACORDE CON LAS NORMAS ISO 2372 - ISO 10816. ....	98
TABLA 12. EJEMPLO DE LAS RECOMENDACIONES SUMINISTRADAS POR LOS FABRICANTES CON RESPECTO A LA LUBRICACIÓN.....	128
TABLA 13. EJEMPLO DE LAS RECOMENDACIONES DE UN FABRICANTE CON RESPECTO A LAS GRASAS QUE SE DEBEN USAR EN SUS MOTORES ELÉCTRICOS. ....	129
TABLA 14. RELACIÓN BÁSICA DE PROBLEMAS CON MOTORES. ....	131

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. TIPOS DE MANTENIMIENTOS. ....	116
ANEXO B. ERROR HUMANO. ....	123
ANEXO C. TABLAS PARA LUBRICACIÓN DE MOTORES ELÉCTRICOS .....	127
ANEXO D. TABLAS DE SOLUCIÓN DE PROBLEMAS PARA MOTORES ELÉCTRICOS ASÍNCRONOS .....	130
ANEXO E. HERRAMIENTAS ADICIONALES DE CONFIABILIDAD OPERACIONAL .....	132

# **TITULO: CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PARA MOTORES TRIFÁSICOS ASÍNCRONOS APLICANDO EL MÉTODO DE ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS (AMFE) \***

**Autor:** Ludwing Darío Muñoz Caballero \*\*

**Palabras Claves:** Motor de inducción, AMFE, mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo, modo de falla, causa de falla, efecto de falla, número de prioridad de riesgo.

## **RESUMEN**

Este trabajo se desarrolló con el fin de aportar conocimiento teóricos sobre uno de los principales campos de acción de los ingenieros eléctricos y electrónicos en la industria actual, el mantenimiento de equipos. Más específicamente se realizó la descripción de una serie de conceptos cuyo objetivo fundamental fue el de brindar criterios sólidos para poder determinar correctamente un plan de mantenimiento preventivo para una de las principales máquinas de la industria actual, el motor eléctrico asíncrono o de inducción. Se mostró, basándose en la aplicación de la metodología de análisis modal de fallos y efectos (AMFE), que este plan de mantenimiento se debe determinar de acuerdo al contexto operacional específico del equipo, con el fin de asegurar una buena utilización de recursos y de determinar el menor número de tareas que garanticen la confiabilidad y disponibilidad del proceso donde esté el mismo. Es decir, que además de dedicar esfuerzos para realizar correctamente las tareas de mantenimiento se debe prestar especial atención para verificar que las tareas que se están haciendo son realmente las que se necesitan.

Se busca identificar los principales elementos de los motores de inducción y las fallas que se pueden presentar en cada una de ellas. También se muestra cómo se pueden aplicar distintas técnicas de mantenimiento predictivo como termografía, análisis de vibraciones, ultrasonido y MCSA para detectar estas fallas de manera temprana y así mitigar sus consecuencias, o de ser posible, evitar que ocurran.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Julio Augusto Gélvez.

# **TITLE: CRITERIA USED FOR DESIGNING A PLAN OF MAINTENANCE FOR ASYNCHRONOUS MOTORS USING THE FAILURE MODES AND EFFECTS ANALYSIS (FMEA) \***

**Author:** Ludwing Darío Muñoz Caballero \*\*

**Keywords:** Induction motor, FMEA, preventive maintenance, predictive maintenance, corrective maintenance, failure mode, cause of failure, effect of failure, risk priority number.

## **ABSTRACT**

This work was developed in order to provide theoretical knowledge about one of the main fields of action of electrical and electronic engineers in the industry today, the maintenance of equipment. More specifically, this project makes a description of a number of concepts whose primary goal is to provide robust criteria to determine a proper preventive maintenance plan for one of the most important machines in the current industry, the electric asynchronous motor. It was shown, based on the application of the failure modes and effects analysis (FMEA) methodology, that this maintenance plan should be determined according to the specific operational context of the equipment, in order to ensure good use of resources and to determine the minimum number of tasks that ensure the reliability and availability of the process in which it is. This means that besides putting a lot of efforts in order to correctly perform maintenance tasks, you should also pay particular attention to ensure that the tasks that are being done are the ones that are really needed.

It seeks to identify the main elements of an induction motor and the failures that can occur in each one of them. It also shows how different predictive maintenance techniques as thermography, vibration analysis, ultrasound and MCSA can be applied in order to detect these failures early and thus, to mitigate their consequences, or if possible, to prevent their occurrence.

---

\* Work Degree.

\*\* Faculty of Physical-mechanical Engineering. School of Electric, Electronics and Telecommunications Engineering. Director: Julio Augusto Gélvez.

## **GLOSARIO**

### **ACTIVO FÍSICO**

Objetos o bienes que posee una persona natural o jurídica. Por ejemplo, maquinarias, equipos, edificios, muebles o vehículos.

### **CONFIABILIDAD**

Capacidad de un activo físico o sistema de realizar una función prevista para la cual fue diseñado a los niveles requeridos durante su periodo de vida útil.

### **DESGASTE**

Pérdida de material de la superficie de un elemento como resultado de una acción mecánica.

### **DISPONIBILIDAD**

Depende directamente de la fiabilidad y la mantenibilidad. Se puede definir como la relación entre el tiempo en el que el activo físico o sistema está disponible para cumplir sus funciones a un nivel requerido y el tiempo en parada o reparación.

### **FALLA**

Estado en el cuál un activo físico o sistema deja de cumplir con sus funciones a un nivel requerido.

### **MANTENIBILIDAD**

Es la aptitud de un activo físico o sistema para ser mantenido, restaurado a su estado de funcionamiento normal, incluyendo la disponibilidad de tiempo, materiales y mano de obra. Depende del diseño y de la eficacia del sistema de mantenimiento.

## PARADA

Cesación de la aptitud de un activo físico o sistema para cumplir con su función.

## RECAMBIO

Aplicación de mantenimiento correctivo o preventivo que implica la sustitución de una pieza o elemento de un activo físico.

## SISTEMA

Conjunto de activos físicos (maquinarias, equipos, entre otros) configurados para realizar o llevar a cabo un proceso.

## SUBSISTEMA

Maquinarias, equipos, elementos, componentes de un sistema.

## VIDA PROMEDIO

Muchos elementos similares pueden presentar fallas a diferentes edades, mas, estas fallas tienden a concentrarse alrededor de una edad específica, a esta se conoce como vida promedio.

## VIDA ÚTIL

Está definida por la edad a la que un elemento presenta un rápido incremento en la probabilidad condicional de falla.

## INTRODUCCIÓN

El continuo desarrollo de la sociedad en que se vive ha dado origen a un proceso tecnológico, económico, social y cultural a gran escala, que entre otras cosas ha permitido que los mercados se expandan rápidamente a lo largo del globo. Esta posibilidad ha generado que la competencia existente entre los grandes productores crezca a pasos agigantados y por ende, que los mismos busquen estrategias para superar los estándares existentes (fabricación, distribución, calidad, seguridad, mantenimiento, costos, etc.) y así, obtener un mayor reconocimiento de los consumidores, aumentar las ventas y maximizar las ganancias.

Todo esto hace pensar que la mayor parte del mercado mundial quedará en manos de las llamadas “empresas globales” y que dentro de ellas, liderarán las que sean competidoras de clase mundial.

Para llegar a ser un competidor de clase mundial se deben atacar distintos y numerosos frentes, los productos deben estar siempre en el lugar adecuado en el momento preciso, a un costo que el cliente esté dispuesto a pagar, y con elevados requerimientos de diferenciación y calidad, se deben eliminar los "desperdicios", que podemos definir como toda aquella actividad que utiliza recursos pero que no genera valor a los ojos del cliente.

Tal vez una de las cosas que más impacta de manera negativa el desempeño de las industrias, son las paradas indeseadas del proceso, que pueden ocurrir por varias razones entre las cuales se puede destacar la ocurrencia de fallas en los equipos. Estas paradas ocasionan tiempos muertos o improductivos que traen consigo grandes pérdidas económicas y además afectan la moral del personal y el ambiente laboral. Es por esto que se vuelve fundamental el poder contar con planes de mantenimiento que aumenten el tiempo de vida útil de los equipos y que mantengan el buen desempeño de los mismos, ya que se va a prevenir la

aparición de estas fallas o de no ser posible, a mitigar al máximo sus efectos negativos, además de mantener los estándares de calidad, seguridad, tiempos y eficiencia en los mismos.

En la actualidad se utilizan diversos tipos de mantenimiento, entre los cuales se pueden destacar: el mantenimiento preventivo, el mantenimiento predictivo y el mantenimiento correctivo. Solo se debe definir adecuadamente el mejor tipo de mantenimiento para cada uno de los equipos que conforman los procesos. Para esto existen una gran variedad de criterios basados en la experiencia, la estadística, las recomendaciones de los fabricantes, entre otros. Sin embargo, en la actualidad, una de las principales herramientas de análisis para determinar las tareas de mantenimiento más efectivas basándose en las causas y consecuencias de las fallas potenciales que se pueden presentar en los equipos, es conocida como AMFE o análisis modal de fallos y efectos, y es sobre la cual se concentrará este trabajo.

Uno de los principales y tal vez más abundantes equipos en las industrias manufactureras es el motor eléctrico trifásico asíncrono o de inducción, que es uno de los preferidos en la industria, por su sencillez, forma constructiva, precio y robustez.

A continuación se presenta el desarrollo del marco contextual en el que se pretende describir los criterios para desarrollar un plan de mantenimiento para los motores trifásicos asíncronos, haciendo uso de la metodología AMFE, que incluya la aplicación de técnicas avanzadas de mantenimiento basado en la condición y que permita aumentar la confiabilidad, disponibilidad y tiempo de vida útil de estas importantes máquinas eléctricas, las cuales son fundamentales para la realización de numerosas tareas de los procesos productivos que se llevan a cabo en las industrias.

## **1. MARCO CONCEPTUAL**

### **1.1. MANTENIMIENTO Y CONFIABILIDAD OPERACIONAL**

Antes de empezar con el tema principal de este trabajo, es necesario conocer algunos conceptos que permitirán al lector ponerse en contexto y darle al tema la importancia y atención que se merece. Es por esto que debe hacerse una descripción de la evolución e importancia del mantenimiento a lo largo de la historia hasta llegar al desarrollo de la metodología foco de este trabajo, el AMFE y de algunas de las herramientas de los sistemas de confiabilidad operacional que están siendo usados en la industria actual.

La confiabilidad operacional se puede definir como una serie de prácticas de mejoramiento continuo, que involucran avanzadas herramientas de diagnóstico, metodologías de análisis y nuevas tecnologías, que buscan asegurar que los procesos con sus respectivos equipos puedan cumplir con su función dentro de los límites y el contexto operacional deseados.

Con la finalidad de mejorar la rentabilidad de los procesos productivos, cada día en el interior de las industrias se dedican enormes esfuerzos a la búsqueda de métodos para mejorar la confiabilidad y disponibilidad de los equipos con los que se cuenta. Se ha llegado a la conclusión de que una de las principales “armas” para lograrlo es optimizar la solución de problemas, buscando que las decisiones que se toman con respecto a las mismas sean realmente efectivas, acertadas y que aseguren un impacto positivo en todas las áreas e indicadores de las empresas (seguridad, medio ambiente, calidad, costos, etc), lo cual permite que se fomente una buena imagen de las mismas y que la satisfacción de los clientes y del personal vayan en aumento. Todo esto se puede considerar como el objetivo fundamental de lo que se conoce como la filosofía de las empresas de Clase

Mundial, la cual se focaliza en cuatro grandes aspectos: la excelencia en los procesos, la máxima disponibilidad, seguridad y producción requeridos, la calidad y rentabilidad de los productos y la motivación y satisfacción del personal.

## **1.2. HERRAMIENTAS DE CONFIABILIDAD OPERACIONAL**

La confiabilidad operacional utiliza una serie de herramientas que permiten evaluar el estado físico y el desempeño de los componentes de forma sistemática con el fin de poder determinar la magnitud del riesgo de que se presenten fallas y las acciones de prevención que se requieren para evitar que estas ocurran.

A continuación se describen brevemente algunas de estas herramientas de confiabilidad operacional más utilizadas a nivel mundial.

*Análisis Modal de fallos y Efectos (AMFE):* Es la herramienta principal de este trabajo. Es también conocida como análisis de modos y efectos de fallas (FMEA) y es un proceso sistemático que identifica fallas potenciales tanto de diseño como de proceso antes de que estas ocurran, con la intención de eliminar o mitigar los riesgos asociados con ellas. El AMFE documenta las acciones preventivas y la revisión del proceso.

*Otras herramientas de la Confiabilidad Operacional:* Dentro de las herramientas de confiabilidad operacional que no se tratarán en este trabajo, se encuentran: análisis de criticidad, análisis de causa raíz, inspección basada en riesgos, análisis de árbol de falla y optimización de costo-riesgo. Sin embargo se hace una descripción de cada una en el anexo E.

### **1.3. TEORÍA Y EVOLUCIÓN DEL MANTENIMIENTO**

Hoy en día uno de los factores más importantes que se debe considerar en las grandes y medianas industrias con el fin de incrementar su productividad, es la implementación de una adecuada estrategia de mantenimiento que permita aumentar la vida útil y la disponibilidad de las máquinas que llevan a cabo los distintos procesos productivos. Es necesario hacer notar que la actividad de “mantener”, si es llevada a cabo de la mejor manera, puede generar un mejor producto, de mejor calidad, en mayor cantidad y con costos de producción más bajos.

Durante el último par de décadas, el mantenimiento es probablemente una de las disciplinas que ha presentado más cambios. Estos se deben principalmente al enorme aumento en número, variedad, complejidad y costo de los activos físicos (equipos, instalaciones) que deben ser mantenidos en las industrias de todo el mundo, además de la aparición de nuevas estrategias de mantenimiento, y una óptica cambiante de la organización y las responsabilidades del mismo. También está respondiendo a nuevas exigencias y expectativas. Estas incluyen una creciente toma de conciencia para evaluar hasta qué punto las fallas en los equipos afectan la seguridad y el medio ambiente, la relación entre el mantenimiento y la calidad del producto, y la presión de alcanzar una alta disponibilidad en la planta y mantener los costos en niveles aceptables.

Hacia la segunda guerra mundial se dieron cambios drásticos, ya que aumentó la demanda de todo tipo de bienes, al mismo tiempo que decayó el número de trabajadores. Además comenzó a aumentar la cantidad y complejidad de las máquinas y la industria comenzó a depender de ellas. Al incrementarse esta dependencia, la atención se concentró en los tiempos de parada de máquina, lo cual llevó a la idea de que las fallas en los equipos debían ser prevenidas, dando

lugar al concepto de “mantenimiento preventivo” (el cual en la década del sesenta consistía principalmente en hacer reparaciones mayores a intervalos regulares).

Con los años, el costo de este mantenimiento comenzó a crecer rápidamente con relación a otros costos operacionales. Esto generó una necesidad de desarrollar sistemas de planeación y control de mantenimiento que además de controlar los costos también maximizaran la vida útil de los activos.

Los esfuerzos dedicados a este desarrollo empezaron a cambiar muchas de las creencias que se tenían. “Se concluyó que un gran número de las tareas de mantenimiento que se aplicaban no lograban ningún resultado y podían llegar a ser hasta contraproducentes, y por otro lado, que conforme se desarrollan nuevos equipos se requieren nuevas tareas que todavía no están incluidas en los programas de mantenimiento. En otras palabras, que se debe prestar mucha atención para hacer las tareas de mantenimiento correctamente, pero se necesita mucha más para asegurarse que los trabajos que se planean son los trabajos que verdaderamente deben hacerse”. [31]

Concretamente se puede definir el mantenimiento como “la función o conjunto de funciones subordinadas a la producción continua, que busca principalmente evitar y de no ser posible, reparar en forma rápida y barata cualquier desperfecto que se presente en los equipos, con el fin de permitirles ejecutar correcta y eficazmente las tareas para las que fueron adquiridos (asegurar la confiabilidad y disponibilidad de los equipos). Al mismo tiempo que busca obtener una menor contaminación del medio ambiente y una mayor seguridad para el personal a los menores costos posibles”. [28]

A lo largo de la historia se han reconocido gran variedad de tipos y técnicas de mantenimiento, sin embargo en la actualidad básicamente se resumen en tres principales que son el mantenimiento preventivo, predictivo (de las cuales se

desprende el mantenimiento proactivo) y correctivo (para ver la definición de cada uno de ellos, ver anexo A).

#### **1.4. MOTORES ELÉCTRICOS ASÍNCRONOS O DE INDUCCIÓN**

Los motores eléctricos son máquinas que transforman la energía eléctrica, en energía mecánica (velocidad y torque) que es entregada en el eje de los mismos.

En nuestros días existe una gran variedad de motores eléctricos. Se pueden clasificar según su forma de alimentación (corriente continua o corriente alterna, monofásicos o trifásicos) y su constitución interna (universal, de rotor bobinado, de jaula de ardilla, etc.) y dependiendo del tipo de motor que se seleccione, se tendrá un funcionamiento y unas condiciones de trabajo particulares, ya que la mayoría de ellos tienen aplicaciones muy específicas.

En nuestros días, el motor trifásico asíncrono es por mucho el motor más empleado en la industria, se pueden encontrar en una gran cantidad de máquinas – herramientas diseñadas para facilitarnos la vida y trabajar en casi cualquier aplicación que una persona pueda imaginar, como por ejemplo: elevación y transporte de cargas, bombeo de fluidos, procesamiento de alimentos, compresores, etc.

Se pueden clasificar de acuerdo a varios criterios, entre ellos están:

- Según la conexión para energizar los devanados del estator: Monofásicos o trifásicos.
- Según el tipo de inducido: *Rotor devanado* (los devanados del rotor son similares a los del estator con el que está asociado) y *Rotor en jaula de ardilla* (los conductores del rotor están igualmente distribuidos por la periferia del mismo y sus extremos están cortocircuitados).

#### 1.4.1. Principio de Operación

Cuando se alimenta el motor, se hace que circulen corrientes trifásicas equilibradas desfasadas  $120^\circ$  a través de los devanados del estator. Esto genera un campo magnético giratorio de magnitud constante que envuelve al rotor y que gira a una velocidad también constante (la velocidad síncrona), correspondiente a la frecuencia de la fuente de alimentación. Al ocurrir esto, se induce una tensión en el devanado del rotor de acuerdo con la ley de inducción de Faraday y al mismo tiempo se presenta lo que se conoce como el “efecto motor”, según el cual todo conductor por el que circula una corriente eléctrica y que está dentro de un campo magnético experimenta una fuerza que tiende a ponerlo en movimiento. En concreto lo que sucede es que la interacción entre el campo magnético giratorio y las corrientes inducidas en los conductores del rotor, generan una fuerza electrodinámica que hacen girar al rotor del motor (siempre que el par de la carga sea menor que el par de arranque generado por el motor).

“En condiciones sin carga, el rotor alcanza pronto una velocidad casi igual a la síncrona, pero nunca puede girar a ella porque sus bobinas parecerían estacionarias respecto al campo rotatorio y no habría fuerza electromotriz inducida en ellas, por lo cual no habría corriente en los conductores del rotor, y en consecuencia tampoco experimentarían fuerzas. En ausencia de una fuerza, el rotor tendería a disminuir su velocidad lo cual haría que el proceso de inducción se presente de nuevo”. [8]

Esta velocidad angular relativa entre el eje del rotor y el campo magnético giratorio, necesaria para que sea producido el momento electromagnético motor, se conoce como deslizamiento.

## 2. ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS, AMFE

Entre los nuevos desarrollos generados por la creciente búsqueda de avances en el área del mantenimiento, cabe resaltar los siguientes:

- “Herramientas de soporte para la toma de decisiones, tales como el estudio de riesgo, análisis de modos de falla y sus efectos, y sistemas expertos.
- Nuevos métodos de mantenimiento, tal como el monitoreo de condición.
- Diseño de equipos, con un mayor énfasis en la confiabilidad y facilidad para el mantenimiento.
- Un drástico cambio en el modo de pensar de las organizaciones hacia la participación, el trabajo en grupo y la flexibilidad”. [31]

Como se puede apreciar son muchos y variados los avances que se han logrado durante el último siglo en lo que tiene que ver con mantenimiento. Es por esto que tal vez el mayor desafío que enfrenta el personal de hoy en día es aprender acerca de cada una de estas técnicas y decidir cuales valen la pena y cuáles no para cada una de las empresas, ya que si se toman las apropiadas se pueden obtener todos los beneficios de los que se ha venido hablando hasta el momento, pero por otro lado, si se toman las inadecuadas se pueden crear nuevos problemas y/o empeorar los que ya existen.

La primera industria formal que trató de dar solución a este desafío fue la industria de la aviación. En aras de asegurar que se estuvieran haciendo las tareas que verdaderamente debían hacerse, desarrollaron una serie de procesos de toma de decisión que dieron origen a metodologías que buscan asegurar que los equipos puedan cumplir con la tarea para la cual fueron adquiridos y puestos en funcionamiento, sin importar las condiciones en las cuales tengan que operar o el tiempo que lo lleven haciendo. La principal es conocida como análisis modal de fallos y efectos (AMFE).

“El AMFE es una técnica de ingeniería usada para definir, identificar y eliminar fallas conocidas o potenciales, problemas o errores, desde el diseño, proceso y operación de un sistema, antes que este pueda afectar al cliente”. [36]

Este método es una de las más importantes técnicas para prevenir situaciones anormales, ya sea en el diseño o en la operación de los equipos. Su objetivo es definir tareas preventivas para evitar posibles averías, a diferencia de otras técnicas que buscan evaluar las anomalías ya ocurridas.

Los propósitos del método análisis modal de fallas y efectos son:

- “Identificar los modos de fallas potenciales y conocidos.
- Identificar las causas y efectos de cada modo de falla.
- Priorizar los modos de falla identificados de acuerdo al número de prioridad de riesgo (NPR) o la frecuencia de ocurrencia, gravedad y grado de facilidad para su detección.
- Documentar las acciones preventivas para evitar que estos ocurran”. [36]

El fundamento de la metodología es la identificación y prevención de las averías conocidas (se han presentado en el pasado) o potenciales (no se han presentado hasta la fecha) que se pueden producir en un equipo o sistema. Para lograrlo es necesario realizar una priorización de los problemas que se pueden presentar.

Existen tres criterios que permiten definir la prioridad de las averías:

- Ocurrencia (O)
- Severidad (S)
- Detección (D)

La ocurrencia es la frecuencia de la avería. La severidad es el grado de efecto o impacto de la avería. La detección es el grado de facilidad para su identificación. Existen diferentes formas de evaluar estos componentes. La forma más usual es el empleo de escalas numéricas llamadas *criterios de riesgo*.

Los criterios pueden ser cuantitativos y/o cualitativos. Sin embargo, los más utilizados son los cuantitativos. El valor más común en las empresas es la escala de 1 a 10, la cual es fácil de interpretar y precisa para evaluar los criterios. El valor inferior de la escala se asigna a una avería con la menor probabilidad de ocurrencia, menor severidad y mayor facilidad de identificación cuando esta se presenta. De igual forma un valor de 10 se asignará a las averías de mayor frecuencia de aparición, mayor severidad y que tienen una gran dificultad para su identificación.

La prioridad del problema o avería se obtiene a través del índice conocido como Número Prioritario de Riesgo (NPR). Este número es el producto de los valores de ocurrencia, severidad y detección, sirve para clasificar en un orden cada uno de los modos de falla que existen en un sistema y por medio de él, se hace la evaluación del riesgo para determinar qué tipo de acción se debe tomar. Generalmente se ha interpretado de la siguiente forma el criterio de riesgo:

- “Debajo de un riesgo menor, no se toma acción alguna.
- Debajo de un riesgo moderado, alguna acción se debe tomar.
- Debajo de un alto riesgo, acciones específicas se deben tomar. Se realiza una evaluación selectiva para implantar mejoras específicas.
- Debajo de un riesgo crítico, se deben realizar cambios significativos del sistema. Modificaciones en el diseño y mejora de la confiabilidad de cada uno de los componentes”. [36]

Existen dos tipos de AMFE: el *AMFE de producto*, que sirve como herramienta en el diseño de un producto o servicio y el *AMFE de proceso* que como su nombre lo indica sirve como herramienta para un proceso que permite la obtención de un producto o la prestación de un servicio.

En general, los dos tipos de AMFE deben ser utilizados en una secuencia lógica durante el proceso de planificación. Esta secuencia es idéntica para los dos tipos mencionados y se muestra en la figura a continuación.

**Figura 1.** Diagrama de flujo del proceso AMFE.

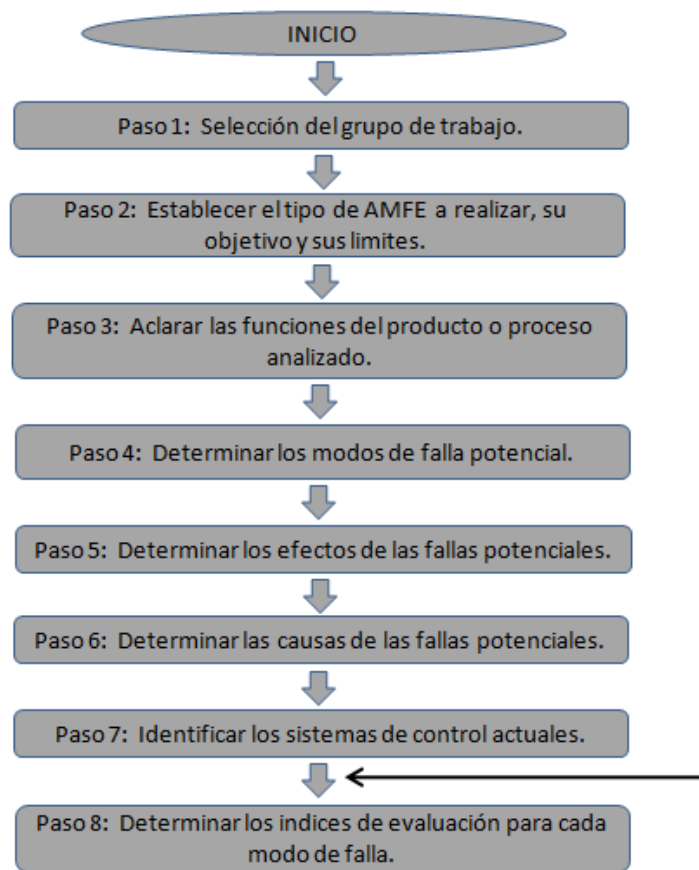
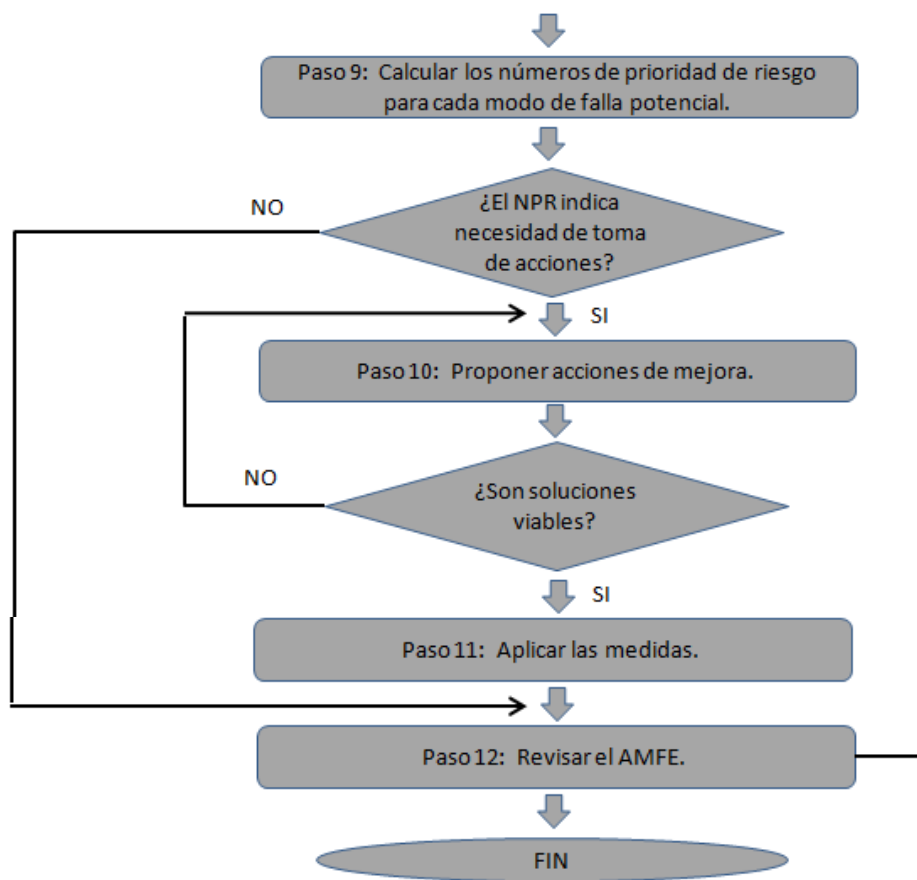


Figura 1. (Continuación)



Fuente: <http://www.fundibeq.org>

El AMFE se ha convertido en algo fundamental para realizar un cuidado eficaz de los equipos. Es una gran técnica para determinar la cantidad mínima segura de tareas que deben ser hechas para preservar las funciones de los activos físicos, especialmente en situaciones críticas o peligrosas.

El punto de partida es la idea de que cuando se quiere mantener algo hay que preguntarse, ¿Qué es eso que se desea causar que continúe?, ¿Cuál es el estado existente que se desea preservar? La respuesta a estas preguntas está dada por el hecho de que todo activo físico es puesto en funcionamiento porque alguien quiere que haga algo, en otras palabras, se espera que cumpla una función o

ciertas funciones específicas. Por ende al mantener un activo, el estado que se debe preservar es aquel en el que continúe haciendo aquello que los usuarios quieren que haga.

Específicamente, el AMFE busca dar respuesta a las siguientes preguntas:

- “¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento asociados al activo en su actual contexto operacional?”
- ¿De qué manera falla en satisfacer dichas funciones?
- ¿Cuál es la causa de cada falla funcional?
- ¿Qué sucede cuando ocurre cada falla?
- ¿Qué puede hacerse para prevenir o predecir cada falla?” [31]

Por lo tanto, el primer paso es definir las funciones de cada activo en su contexto operacional, junto con los parámetros de funcionamiento deseados (lo que los usuarios quieren que el activo haga). Las cuales pueden ser divididas en dos categorías:

- *Funciones primarias*, que básicamente resumen el por qué se adquirió el activo. “Esta categoría de funciones cubre temas como velocidad, producción, capacidad de almacenaje o carga, calidad de producto y servicio al cliente. Estas funciones generalmente son fáciles de reconocer, el desafío está en definir las expectativas de funcionamiento asociadas a ellas”. [31]
- *Funciones secundarias*, que son las que resumen que normalmente se espera que cada activo haga más que simplemente cubrir sus funciones primarias. Ya que en muchos casos también “se tienen expectativas relacionadas con las áreas de seguridad, control, contención, confort, integridad estructural, economía, protección, eficiencia operacional, cumplimiento de regulaciones ambientales y hasta de apariencia del activo”. [31]

## **2.1. CÓMO DEFINIR LAS FUNCIONES**

Se ha establecido que para definir una función se debe usar un verbo y un objeto, por ejemplo, “bombear crudo”, “triturar arroz”, etc. Sin embargo, como ya se ha mencionado, no solo se espera que el activo cumpla con su(s) función(es), sino que lo haga con un nivel de funcionamiento aceptable. Luego esta definición debe también, especificar este nivel tan precisamente como sea posible. Por ejemplo para el caso anterior, se podría escribir: “bombear crudo a 1000 l/min y 50°C”.

## **2.2. ESTÁNDARES DE FUNCIONAMIENTO**

Para los equipos que forman parte de nuestra tecnología actual el deterioro es inevitable, sin embargo se debe actuar para hacerlo tolerable. Es por esto que la magnitud de aquello que los usuarios quieren que el activo haga debe definirse a través de un estándar mínimo de funcionamiento, ya que puede ocurrir que al poner un activo físico a trabajar, este no sea capaz de rendir más que este nivel mínimo deseado por el usuario.

Entonces el funcionamiento puede ser definido de las siguientes dos maneras:

- “Funcionamiento deseado (lo que los usuarios quieren que haga): desempeño.
- Capacidad propia (lo que el activo puede hacer)”. [31]

“El mantenimiento contribuye a asegurar que la capacidad de los activos supere siempre a los parámetros mínimos deseados por el usuario o a restaurar algo para que se vuelva a alcanzar la capacidad inicial si se baja de este punto. Cabe mencionar que el mantenimiento solo puede restaurar el activo físico a su nivel de capacidad inicial, no puede ir más allá”. [30]

### **2.3. CONTEXTO OPERACIONAL**

Es el marco o entorno que debe ser tenido en cuenta para definir una estrategia de mantenimiento de cualquier equipo o activo físico. Define las circunstancias en que operará el activo (donde y como).

Generalmente el contexto operacional debe incluir:

- Tipo de proceso: Continuo o en baches.
- Presencia de activos suplentes.
- Políticas de calidad, ambiental y seguridad Industrial.
- Turnos de trabajo.
- Inventario de productos en proceso.
- Tiempo de respuesta ante una falla.
- Políticas para el manejo de repuestos y materias primas.
- Alta temporada de ventas.

“El contexto operacional no sólo afecta drásticamente las funciones y las expectativas de funcionamiento, sino que también afecta la naturaleza de los modos de falla que pueden ocurrir, sus efectos y sus consecuencias, la periodicidad con la que pueden ocurrir y que debe hacerse para manejarlas, todo esto significa que se debe tener un claro entendimiento del contexto operacional antes de comenzar”. [30]

### **2.4. FALLAS FUNCIONALES**

Se puede definir una falla funcional de las siguientes maneras:

- “Es la incapacidad de un equipo o sistema de realizar las tareas o cumplir con los requerimientos para los que fue diseñado o adquirido.

- Es la pérdida o la negación de una función.

Por lo general los activos tienen varias funciones diferentes, por lo cual también pueden tener varias fallas funcionales diferentes. Por ejemplo, una bomba tiene al menos dos funciones. Una es la de bombear agua a no menos de 800 litros por minuto y la otra es contener el agua. Es perfectamente posible que dicha bomba sea capaz de bombear la cantidad requerida (no hay falla de la función primaria) a la vez que pierda una cantidad excesiva de líquido (falla en la función secundaria). Esto muestra que es más preciso definir una falla en términos de la pérdida de una función específica, más que la falla del activo como un todo". [31]

## **2.5. MODOS DE FALLA**

Al definir las funciones y los parámetros de funcionamiento deseados de cualquier activo físico, se definen automáticamente los objetivos de mantenimiento para dicho activo. De la misma forma, al definir las fallas funcionales se pueden determinar exactamente que se quiere decir con falla.

El siguiente paso en el proceso es la identificación de aquellos modos de falla que sean los posibles causantes de cada falla funcional, y determinar los efectos de falla asociados con cada modo de falla. Para esto se define un modo de falla como cualquier evento que causa la pérdida total o parcial de una función de un equipo, es decir una falla funcional.

La mejor manera de mostrar la conexión y la diferencia entre los estados de falla y los eventos que podrían causarlos es primero hacer un listado de las fallas funcionales y luego registrar los modos de falla que podrían causar cada falla funcional, como lo muestra la tabla 1.

**Tabla 1.** Ejemplo de modos de falla para una bomba.

FUNCIÓN		FALLA FUNCIONAL (PERDIDA DE FUNCIÓN)		MODO DE FALLA (CAUSA DE LA FALLA)	
1	TRANSFERIR AGUA DESDE EL TANQUE X AL TANQUE Y, A NO MENOS DE 800 LITROS/MINUTO	A	INCAPAZ DE TRANSFERIR AGUA	1	COJINETES AGARROTADOS.
				2	IMPULSOR SUELTO.
				3	IMPULSOR TRABADO POR UN CUERPO EXTRAÑO.
				4	EL ACOUPLE FALLA POR FATIGA.
				5	MOTOR QUEMADO.
				6	VALVULA DE INGRESO ATASCADA EN POSICION CERRADA.
				7	OTROS.
		B	TRANSFIERE MENOS DE 800 L/min	1	IMPULSOR GASTADO.
				2	LINEA DE SUCCION PARCIALMENTE BLOQUEADA.
				3	OTROS.

Fuente: Ver referencia [31].

Sin embargo cabe aclarar que la descripción de un modo de falla debe ser lo suficientemente detallada para poder seleccionar una estrategia de manejo de falla apropiada, pero no tanto como para perder mucho tiempo en el propio proceso de análisis (se profundizará sobre esto más adelante).

### 2.5.1. Categorías de modos de falla

Los modos de falla pueden ser clasificados en tres grupos de la siguiente manera:

- Cuando la capacidad cae por debajo del funcionamiento deseado.
- Cuando el funcionamiento deseado se eleva encima de la capacidad inicial.
- Cuando desde el comienzo el activo físico no es capaz de hacer lo que se quiere.

#### 2.5.1.1. Capacidad decreciente

Como su nombre lo indica, esta categoría consta de las situaciones en las cuales un activo comienza con un desempeño que supera o cumple con las expectativas del usuario pero con el tiempo comienza a decaer hasta quedar por debajo de las mismas.

#### 2.5.1.2. Aumento en el desempeño deseado o aplicado

La segunda categoría de modos de falla ocurre cuando el desempeño deseado es cubierto por la capacidad inicial del activo, pero posteriormente las expectativas crecen de tal manera que superan esa capacidad inicial. Esto provoca que el bien falle por una de dos maneras:

- El desempeño deseado aumenta hasta que el activo no puede cumplirlo.
- El incremento de esfuerzo causa deterioro, hasta el punto en que el activo pasa a ser tan poco confiable que se vuelve inútil.

#### 2.5.2. Como definir los modos de falla

“En la práctica puede ser muy difícil encontrar el nivel de detalle necesario. Pero es importante hacerlo, ya que esto afecta profundamente la validez del AMFE y la cantidad de tiempo necesaria para llevarlo a cabo. La falta de detalles, o la mención de solo unos pocos modos de falla, llevan a análisis superficiales y a veces peligrosos. Por otro lado, demasiados detalles y modos de falla, provoca que todo el proceso demore mucho más de lo necesario. Esto significa que es esencial tratar de encontrar el balance exacto” [31]. Algunos de los factores clave se discuten en los párrafos siguientes.

#### 2.5.3. Causalidad

Las causas de toda falla funcional pueden definirse a niveles de detalle variados y pueden aplicarse diferentes niveles a distintas situaciones. En un extremo, puede ser suficiente resumir las causas de las fallas funcionales con un enunciado como “el motor falla”. Mientras que por otro, puede ser necesario considerar un nivel de detalle bastante profundo para definir la causa raíz de la falla (por ejemplo un pequeño tornillo que se soltó).

Un ejemplo del grado en el cual los modos de falla pueden ser descritos se ilustra en la tabla 2. Esta tabla se basa en la bomba cuyos modos de falla se enunciaron en la tabla 1. Se enuncia el caso en que la bomba sufra la falla funcional “incapacidad total de transferir agua”, la cual se considera en siete diferentes niveles de detalle. El nivel superior (nivel 1) es una falla de la bomba instalada como un todo (es decir vista como el conjunto de motor, bomba, eje, tuberías de succión y descarga y el sistema eléctrico). El nivel dos reconoce la falla de uno de estos componentes de la bomba, en este caso la bomba en sí. De ahí en adelante las fallas se consideran progresivamente en más detalle.

**NOTA:** Cuando se considera este ejemplo, se debe tener en cuenta que: No se trata de clasificaciones universales, no se muestran los modos de falla para los 4 componentes restantes (los del motor, el eje, las tuberías de succión y descarga y el sistema eléctrico) y no se muestran todas las posibilidades de falla en cada sector.

Además cabe aclarar que el apéndice o anexo B tiene que ver con los errores humanos y se encuentra al final de este libro.



#### 2.5.4. Errores Humanos

Los errores humanos pueden causar fallas en las máquinas. Si los modos de falla asociados tienen tendencia a ocurrir, entonces deben ser incluidos en el análisis. Esto fue mostrado en la tabla 2, donde todos los modos de falla enunciados con la palabra “error” se refieren a errores humanos. El anexo B presenta un resumen de los temas claves involucrados con tales errores.

#### 2.5.5. Probabilidad

“Distintos modos de falla ocurren con diferentes frecuencias, algunos pueden ocurrir regularmente, en intervalos promedio medidos en meses, semanas o hasta días. Otros pueden ser extremadamente improbables, lo que significa que los tiempos de intervalos se pueden medir en muchos de años. Cuando se prepara un AMFE, se deben tomar decisiones continuamente sobre los modos de falla que son tan poco probables que se los puede ignorar sin correr riesgos. Esto significa que no se debe tratar de anunciar toda posibilidad de falla sin tener en cuenta sus probabilidades de ocurrir.

Solo de deben listar los modos de falla que se espera que sucedan en el contexto en cuestión. Una lista de modos de falla “razonablemente probables” debe incluir lo siguiente: fallas que ocurrieron anteriormente, modos de falla que están actualmente sujetos a rutinas de mantenimiento, cualquier otro modo de falla que si bien no ha ocurrido aun, se puede considerar una posibilidad real.

De cualquier modo, la decisión de no listar un modo de falla debe ser evaluada con cuidado, teniendo en cuenta las consecuencias de la misma”. [31]

### 2.5.6. Causa vs. Efecto

Se debe tener cuidado en no confundir causas con efectos cuando se enumeran los modos de fallas. Por ejemplo, para un motor que presentó un fallo se podrían haber registrado los modos de falla: “avería de rodamientos por falta de lubricación” y “se quema el devanado del estator” y a partir de estos, haber definido tareas de inspección que tengan que ver con lubricación, termografía, etc. Pero realmente el modo de falla que fue el responsable de la situación fue “falla del motor por alineación deficiente” y simplemente la tarea que debió definirse fue la de verificar la correcta alineación del eje.

Esto resalta la importancia de identificar la verdadera causa que genera los efectos negativos que se están tratando de evitar, y a partir de esto, identificar correctamente la tarea proactiva que se debe aplicar.

### 2.5.7. Modos de falla y contexto operacional

Se describió, cómo las funciones, y fallas funcionales de cualquier ítem se ven influenciadas por su contexto operacional. Esto también es cierto para los modos de falla en lo que respecta a causas, probabilidades y consecuencias. Es por esto que resulta apropiado identificar modos de falla a distinto nivel para dos activos idénticos, si es que estos tienen distintos contextos operacionales.

## 2.6. EFECTOS DE FALLA

El siguiente paso en el proceso AMFE consiste en hacer una lista de lo que sucede al producirse cada modo de falla. Esta lista se denomina efectos de la falla.

Un efecto de falla no es lo mismo que una consecuencia de falla. Un efecto de falla describe en detalle que es lo que ocurre, mientras que una consecuencia de

falla se interesa más en describir cual es la importancia o el impacto de lo que ocurre.

Al describir los efectos de una falla, deben incluirse los siguientes puntos:

- “Evidencia (si la hubiera) de que se ha producido una falla.
- Las maneras (si las hubiera) en que la falla supone una amenaza para la seguridad o el medio ambiente.
- Las maneras (si las hubiera) en que afecta a la producción o a las operaciones.
- Los daños físicos (si los hubiera) causados por la falla.
- Que debe hacerse para reparar la falla”. [30]

#### 2.6.1. Acción Correctiva

Los efectos de las fallas deben también establecer que debe hacerse para reparar las mismas y la magnitud de los tiempos muertos que se van a tener, tal y como se muestra en el ejemplo a continuación:

“Tiempo muerto para reemplazar los rodamientos, alrededor de cuatro horas, tiempo muerto para despejar la obstrucción, alrededor de 30 minutos, tiempo muerto para desmantelar la turbina y reemplazar el disco, alrededor de 2 semanas”. [31]

#### 2.6.2. Cómo se deben registrar los modos de falla y sus efectos

Una vez que se estableció el nivel para todo el análisis, se tiene que decidir qué grado de detalle es necesario para definir cada modo de falla dentro del marco de ese análisis. Como ya se mencionó, deben listarse todos los modos de falla (junto con sus efectos) a un nivel que permita seleccionar una estrategia apropiada de manejo de fallas, sin excederse o quedarse cortos.

Por otro lado, los efectos de las fallas se deben detallar en la última columna de la hoja de información, al costado del modo de falla correspondiente, como se muestra en la tabla 3 a continuación.

**Tabla 3.** Ejemplo de una hoja de información de un AMFE.

<b>SISTEMA:</b> Turbina de Gas 5 MW		<b>SUBSISTEMA:</b> Sistema de escape	
<b>FUNCION</b>	<b>FALLA FUNCIONAL (Pérdida de función)</b>	<b>MODOS DE FALLA (Causa de la falla)</b>	<b>EFECTO DE LA FALLA (Que sucede cuando falla)</b>
Canalizar todo el gas de la turbina de calefacción, sin restricción a un punto fijo de 10 metros por encima del techo del hall de la turbina.	Incapaz de canalizar los gases	Monturas silenciadoras corroídas.	Montaje del silenciador colapsa y cae al fondo de la torre. La presión trasera causa que la turbina surja violentamente y se apague por altas temperaturas de gas de escape. El tiempo de inactividad para reemplazar el silenciador es de 2 días.
	Flujo de gases restringido	Parte del silenciador falla por fatiga.	Dependiendo de la naturaleza del bloqueo, la temperatura de escape puede aumentar hasta apagar la turbina. Los despojos podrían afectar partes de la turbina. El tiempo de inactividad para reparar el silenciador es de 4 semanas.

Fuente: Ver referencia [31].

## 2.7. CAUSAS DE FALLA

Una causa potencial de falla es simplemente un evento cuya consecuencia es el modo de fallo. Las causas encontradas deben ser lo más concisas y completas posibles, de modo que las acciones correctivas y/o preventivas puedan ser orientadas correctamente.

### 2.7.1. Identificar los sistemas de control actuales

En este paso se buscan los controles existentes (si los hay) para prevenir las posibles causas de las fallas o para detectar el modo de falla resultante. Esta

información es útil, pues permite determinar si estos controles ya existentes son suficientes, si se deben modificar, si se deben implementar nuevos, etc.

## 2.8. DETERMINAR ÍNDICES DE EVALUACIÓN

Para lograr los objetivos del AMFE es necesario realizar una priorización de las fallas o averías que se pueden presentar y esta se realiza por medio de tres criterios fundamentales:

- Ocurrencia (O)
- Severidad (S)
- Detección (D)

### 2.8.1. Índice de Ocurrencia (O)

Evalúa en una escala del 1 al 10, la probabilidad de que se produzca el modo de falla debido a cada una de las causas potenciales con base en la tabla que se muestra a continuación.

**Tabla 4.** Tabla de ocurrencia del modo de fallo.

FRECUENCIA	CRITERIO	VALOR
Muy Baja/Improbable	Ningún fallo se asocia a procesos casi idénticos, ni se ha dado nunca en el pasado, pero es concebible.	1
Baja	Fallos aislados en procesos similares o casi idénticos. Es razonablemente esperable en la vida del sistema, aunque es poco probable que suceda.	2-3
Moderada	Defecto aparecido ocasionalmente en procesos similares o previos al actual. Probablemente aparecerá algunas veces en la vida del componente/sistema.	4-5
Alta	El fallo se ha presentado con cierta frecuencia en el pasado en procesos similares o previos procesos que han fallado.	6-8
Muy Alta	Fallo casi inevitable. Es seguro que el fallo se producirá frecuentemente.	9-10

Fuente: Ver referencia [7].

Cuando se asigna la clasificación por ocurrencia, deben ser consideradas dos probabilidades:

- “La probabilidad de que se produzca la causa potencial de la falla.
- La probabilidad de que, una vez ocurrida la causa de la falla, ésta provoque el efecto nocivo (modo de falla) indicado”. [4]

### 2.8.2. Índice de Severidad (S)

Evalúa en una escala del 1 al 10, la gravedad del efecto o consecuencia de que se produzca una determinada falla en el equipo o proceso. La evaluación se realiza con base en la tabla que se muestra a continuación.

**Tabla 5.** Tabla de gravedad del modo de fallo.

GRAVEDAD	CRITERIO	VALOR
Muy Baja/Repercusiones imperceptibles	No es razonable esperar que este fallo de pequeña importancia origine efecto real alguno sobre el rendimiento del sistema. Probablemente, el cliente ni se daría cuenta del fallo.	1
Baja/Repercusiones irrelevantes apenas perceptibles	El tipo de fallo originaría un ligero inconveniente al cliente. Probablemente, éste observaría un pequeño deterioro del rendimiento del sistema sin importancia. Es fácilmente subsanable.	2-3
Moderada/Defectos de relativa importancia	El fallo produce cierto disgusto e insatisfacción en el cliente. El cliente observará deterioro en el rendimiento del sistema	4-6
Alta	El fallo puede ser crítico y verse inutilizado el sistema. Produce un grado de insatisfacción elevado.	7-8
Muy Alta	Modalidad de fallo potencial muy crítico que afecta el funcionamiento de seguridad del producto o proceso y/o involucra seriamente el incumplimiento de normas reglamentarias. Si tales incumplimientos son graves corresponde un 10.	9-10

Fuente: Ver referencia [7]

“Como la clasificación de gravedad o severidad está basada únicamente en el efecto de la falla, todas las causas de falla potenciales para un efecto particular, recibirán la misma clasificación o el mismo Índice de severidad. En el caso en que

una misma causa pueda contribuir a varios efectos distintos del mismo modo de falla, se le asignará el mayor Índice de severidad”. [4]

Siempre que la gravedad sea 9 ó 10, y que la ocurrencia y detección sean superiores a 1, se debe considerar la falla y las características que le corresponden como críticas (aunque el NPR o número de prioridad de riesgo resultante sea menor que el especificado como límite).

### 2.8.3. Índice de Detección (D)

Evalúa para cada causa, la probabilidad de detectar dicha causa y el modo de falla resultante antes de llegar al cliente en una escala del 1 al 10 con base a la "Tabla de Detección" que se muestra a continuación.

**Tabla 6.** Clasificación de la facilidad de detección del modo de fallo.

DETECTABILIDAD	CRITERIO	VALOR
Muy Alta	El defecto es obvio. Resulta bastante probable que sea detectado por los controles existentes.	1
Alta	El defecto, aunque es obvio y fácilmente detectable, podría en alguna ocasión escapar a un primer control, aunque sería detectado con toda seguridad a posteriori.	2-3
Mediana	El defecto es detectable y posiblemente no llegue al cliente. Posiblemente se detecte en los últimos estadios de producción.	4-6
Pequeña	El defecto es de tal naturaleza que resulta difícil detectarlo con los procedimientos establecidos hasta el momento.	7-8
Improbable	El defecto no puede detectarse. Puede ocasionar consecuencias que solo se percibirán cuando el producto llegue al cliente final.	9-10

Fuente: Ver referencia [7]

Durante la etapa de planeación, “para determinar el índice D se supondrá que la causa de la falla ha ocurrido y se evaluará la capacidad de los controles actuales para detectar la misma o el modo de falla resultante”. [4]

## 2.9. CALCULAR EL NPR PARA CADA MODO DE FALLO POTENCIAL

Para cada causa potencial, de cada uno de los modos de falla potenciales, se calculará el *Número de Prioridad de Riesgo* (NPR) multiplicando los Índices de severidad (S), de ocurrencia (O) y de detección (D) correspondientes.

$$\text{NPR} = \text{S} \cdot \text{O} \cdot \text{D}$$

El valor resultante podrá oscilar entre 1 y 1000, correspondiendo a 1000 el mayor potencial de riesgo. Mediante este valor, se priorizarán las causas sobre las cuales habrá que actuar para evitar que se presenten los modos de fallo que representan un mayor riesgo. En caso de que el valor sea menor de 100 NO se requiere tomar ninguna acción preventiva.

“El resultado final de un AMFE es, por tanto, una lista de modos de falla potenciales, sus efectos posibles y las causas que podrían contribuir a su aparición clasificados por unos índices que evalúan su impacto en el cliente” [4]. En la tabla a continuación se muestra un ejemplo de esto.

**Tabla 7.** Ejemplo del cálculo de los índices para un AMFE.

Componente/pieza/operación	Función	Falla			Controles actuales	Indices			
		Modo	Efecto	Causa		S	O	D	NPR
Silla	Sentarse	Inestable	Incomodidad	Medida de las patas no precisa.	Muestreo	6	7	6	252
				Mezcla de piezas buenas y malas.	Ninguno	6	2	9	108
				Tornillos mal fijados.	Ninguno	4	5	10	200
		Rotura	Caída del usuario. Riesgo de daños. Gran insatisfacción.	Material defectuoso.	Muestreo visual en montaje.	10	8	4	320
				Falta tornillo de respaldo.	Inspección final	10	3	6	180

Fuente: Ver referencia [4]

En este ejemplo se podría concluir que el modo de falla más riesgoso y que por tanto requiere de mayor atención a la hora de definir una acción preventiva, es la rotura de la silla, que puede atentar contra la salud y la satisfacción del usuario. Y ya que de las posibles causas de esta rotura, la que obtuvo un mayor NPR es la de “material defectuoso”, la acción preventiva que podría sugerir este análisis es la de desechar la silla y cambiar de proveedor para obtener una de mejor calidad (lo cual a su vez ayudaría a prevenir la siguiente causa de falla con mayor NPR, que es la de “medida de las patas no precisa”).

## **2.10. PROPONER ACCIONES CORRECTIVAS O DE MEJORA**

Cuando se obtengan causas de modos de falla con números de prioridad de riesgo (NPR) elevados, se deben establecer acciones de mejora para evitar que ocurran (acciones correctoras) o por lo menos, para reducir o mitigar la gravedad de sus efectos (acciones contingentes). Asimismo, se deben fijar los responsables y la fecha límite para la implantación de dichas acciones.

## **2.11. REVISAR EL AMFE**

El AMFE se debe revisar periódicamente con el fin de evaluar nuevamente los Índices de Gravedad, Ocurrencia y Detección y recalcular los Números de Prioridad de Riesgo (NPR), para determinar la eficacia de las acciones de mejora. Si con los nuevos NPR se cumplen los objetivos definidos en el AMFE para el producto o proceso afectado, el AMFE puede ser dado por concluido.

## **2.12. INTERPRETACIÓN**

Los puntos prioritarios del AMFE son:

- “Aquellos en que el Número de Prioridad de Riesgo es elevado.

- Aquellos en que el Índice de severidad es muy elevado aunque el NPR se mantenga dentro de los límites normales.

Por otro lado, se puede decir que las acciones que surgen como resultado del AMFE pueden ser orientadas a reducir la gravedad o severidad de los efectos del modo de falla, reducir la probabilidad de ocurrencia o aumentar la probabilidad de detección”. [4]

### **3. ANÁLISIS DE LAS POSIBLES ZONAS DE FALLA DE UN MOTOR ELÉCTRICO TRIFÁSICO ASÍNCRONO**

Complementario a saber cómo realizar correctamente un AMFE, el conocimiento de cuáles son las principales zonas de falla de un motor de inducción resulta ser una fuente de vital importancia que permitirá tener criterios contundentes a la hora de definir el plan de mantenimiento para los mismos.

En muchas ocasiones el personal de mantenimiento de las industrias está limitado al tratar de diagnosticar fallas en motores eléctricos. Y aunque muchas veces, las herramientas comunes como el medidor de aislamiento (megger) permiten identificar algunos problemas, y más recientemente, técnicas de mantenimiento basado en condición como el análisis de vibraciones han ayudado a determinar fallas de todo tipo en los motores (como se verá más adelante), se deben tomar en cuenta muchas variables antes de sacar un motor de servicio. En otras palabras, la aplicación de una herramienta o técnica por sí sola no logra revisar todas las zonas de falla de un motor eléctrico. Es muy fácil dar un diagnóstico erróneamente si se confía solo en los resultados de un megger, por ejemplo.

“Para el diagnóstico de un motor, se han establecido las siguientes zonas de falla:

- Circuito de Potencia.
- Aislamiento.
- Estator.
- Rotor.
- Desbalance mecánico.
- Calidad de energía.

El análisis de estas 6 zonas nos permite distinguir entre un problema mecánico o eléctrico y probablemente detallar su solución”. [22]

### **3.1. CIRCUITO DE POTENCIA**

Generalmente se establece desde el Centro de Control del Motor (CCM) hasta la caja de bornes del mismo, e involucra a todos los conductores con sus bornes, interruptores, protecciones térmicas, fusibles, contactores y cuchillas.

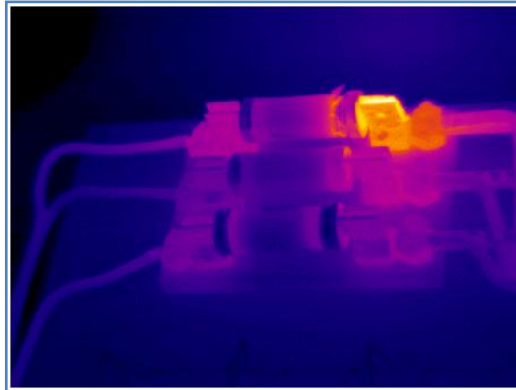
El EPRI o Instituto de investigación de potencia eléctrica (por sus siglas en inglés) en Estados Unidos, ha demostrado que los falsos contactos han sido la fuente de un 46% de las fallas en motores en ese país, lo cual lleva a pensar que aunque muchas veces el motor está en excelente estado, este se instala en un circuito de potencia defectuoso que finalmente lo daña.

Típicamente las conexiones de alta resistencia son causadas por terminales corroídos, cables sueltos, barras sueltas, hilos abiertos, diferentes tamaños de conductores y hasta el sobre apriete de las conexiones.

Uno de los métodos que se usan para detectar defectos en el circuito de potencia de un motor trifásico es la medición de resistencia entre fases, la cual es una prueba estática con motor detenido. En un equipo en buen estado las tres lecturas entre las fases deberían ser casi idénticas y su desbalance resistivo debe ser menor a un 5%. Dinámicamente, con motor energizado el circuito es evaluado completamente al detectarse desbalances de voltaje en cualquiera de las fases.

Como se verá más adelante, otro de los métodos utilizados para complementar el diagnóstico del circuito de potencia es la termografía, sin duda una de las técnicas más conocidas para detectar falsos contactos (figura 2).

**Figura 2.** Desbalance resistivo – falso contacto severo.



Fuente: Ver referencia [22]

### **3.2. CALIDAD DE ENERGÍA**

En muchos casos, la calidad de energía es ignorada por el personal de mantenimiento y sin duda es una zona de falla con mucha influencia en la vida de un motor.

Existen varios factores involucrados en la calidad de energía; distorsión armónica tanto de voltaje como de corriente, variaciones momentáneas de alto y bajo voltaje, transitorios, picos de voltaje, desbalances de voltaje y factor de potencia son algunos de estos. A continuación se describirán algunos de estos factores (se dejan los demás como tema de investigación para los lectores que deseen profundizar en este tema):

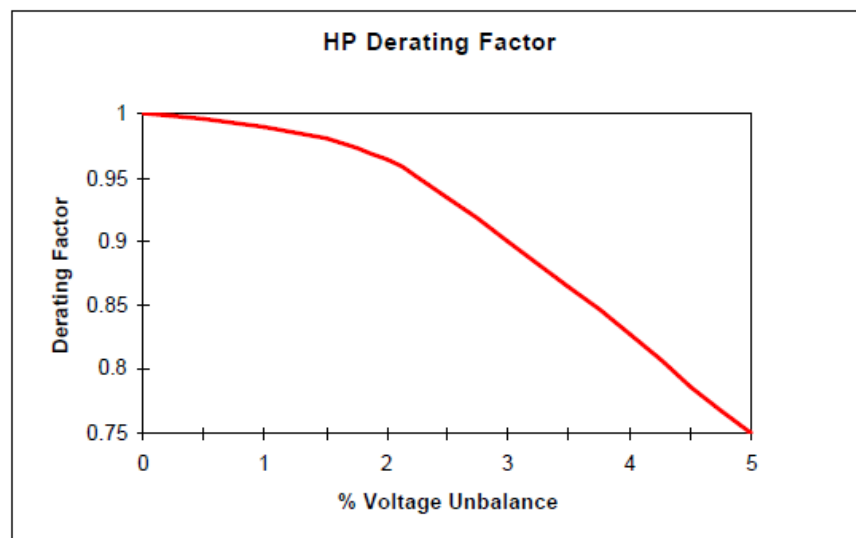
### **3.3. DESBALANCE DE VOLTAJE**

Cuando los voltajes de línea aplicados a un motor no son equilibrados se desarrollan corrientes desbalanceadas en los devanados del estator, a estas se les conoce como corrientes de secuencia negativa y reducen el torque del motor. Se producen dos efectos importantes, aumenta la temperatura en el devanado y aumenta su vibración. Un aumento de la temperatura por encima de su valor

permitido provocará daños al aislamiento, y el aumento en los niveles de vibración provocará en algún grado solturas mecánicas, daño a los rodamientos y aflojamiento de las bobinas. Usualmente son causados por desbalances de cargas en el sistema eléctrico, conexiones deficientes en los terminales del motor o alta resistencia en contactos.

Con desbalances de voltaje presentes, la potencia de placa de un motor debe ser multiplicada por un “factor de reducción” tal y como se observa en la figura 3.

**Figura 3.** Factor de reducción de potencia (NEMA).



Fuente: Ver referencia [22]

De acuerdo a NEMA (National Electrical Manufacturers Association) ningún motor debe ser operado con desbalances de voltaje mayores a un 5%. Esto debido a que por ejemplo un desbalance en la tensión del 1% puede producir diferencias del 6 a 10% en la corriente y elevar la temperatura de los devanados de los motores en 10°C.

### 3.4. EFECTO CORONA

El efecto corona puede llegar a ser un problema serio particularmente en bobinados que operen a tensión superior a 5kV. El efecto Corona es una descarga localizada resultante de la ionización gaseosa en el sistema de aislamiento cuando la tensión excede un valor crítico. Existen 3 tipos básicos de descarga por efecto corona: descargas internas ocurridas en pequeñas cavidades del dieléctrico, descargas ocurridas en la superficie de las espiras, descargas puntuales provenientes de un fuerte campo eléctrico en extremidades o pequeñas aristas.

### **3.5. ARMÓNICOS**

Los armónicos son señales que distorsionan a la onda fundamental, tienen una forma sinusoidal y están presentes en múltiplos de la frecuencia fundamental. Los armónicos generan distorsiones importantes en la forma de onda de voltaje.

Los armónicos existen en todos los sistemas trifásicos y son generados por cargas no-lineales como: Convertidores de potencia electrónicos: rectificadores y variadores de frecuencia (VFD), fluorescentes, hornos de arco, UPS, etc.

Existen tres tipos de armónicos:

- Secuencia positiva: Crean un campo magnético en la dirección de rotación, por lo tanto ayudan al torque del motor.
- Secuencia negativa: Se oponen a la rotación del motor e incrementan la demanda de corriente a una carga determinada.
- Secuencia cero: No producen ningún trabajo, pero causan calentamiento tanto del motor como del transformador de alimentación.

La siguiente tabla muestra un ejemplo de clasificación de cada armónico para un sistema trifásico dado:

**Tabla 8.** Clasificación de armónicos en un sistema trifásico.

Armoni	HZ	Secuen	Armoni	HZ	Secuen
1	60	+	7	420	+
2	120	-	8	480	-
3	180	0	9	540	0
4	240	+	10	600	+
5	300	-	11	660	-
6	360	0	12	720	0

Fuente: Ver referencia [22]

El fenómeno de los armónicos que más afecta para el caso de los motores eléctricos es el excesivo calor que se produce por las demandas de corriente anormales. Un motor diseñado para consumir a plena carga 150 amperios, podría llegar a consumir 180 amperios. Este aumento de corriente perfectamente podría no ser tolerado por el motor, provocar daños severos al aislamiento y el posible colapso del mismo.

Si este problema no es corregido, al instalarse un nuevo motor en este circuito, el fenómeno se repetiría y la situación se convertiría en un círculo vicioso, por esto un análisis de la calidad de energía que le llega a un motor es muy importante.

Una correcta identificación de los armónicos presentes en el circuito de distribución permitirá diseñar o adquirir filtros pasivos y activos para eliminar los efectos anteriormente discutidos. [22]

### **3.6. AISLAMIENTO**

Cuando hablamos de la condición de aislamiento nos referimos a la resistencia que existe entre este y tierra (RTG, en ingles). La RTG indica que tan limpio o sano está un aislamiento.

Para que se dé una falla a tierra, deben ocurrir dos cosas. Primero que se cree un camino de conducción a través del aislamiento (conforme el aislamiento envejece se fisura y posibilita que se acumule material conductor) y segundo, que la superficie exterior del aislamiento conduzca suficiente corriente a la carcasa o núcleo del motor que está conectado a tierra.

En termografía es posible detectar una falla en el aislamiento de un motor si se tiene la clase de aislamiento del mismo (dato de placa), dado que cada clase tiene una temperatura máxima que puede soportar (el aislamiento pierde muy rápido sus propiedades al aumentar la temperatura y esto afecta drásticamente la vida útil del motor). Generalmente al medir la temperatura de la carcasa del motor, se asume que el aislamiento está en 20°C más alto que esta.

Una falla en el aislamiento de un motor, puede presentarse básicamente debido a alguna de las siguientes causas:

- “Circuito de potencia: Una conexión de alta resistencia, produce un voltaje de línea desbalanceado.
- Armónicos: que introducen corrientes de secuencia negativa y sobrecalientan el devanado.
- Ambiental: Contaminación en el motor”. [22]

### **3.7. SOBRETENSIONES**

Las sobretensiones producidas por maniobras de los circuitos de alimentación o descargas atmosféricas pueden provocar fallas del aislamiento de los devanados debido a que generan aumentos considerables de temperatura en el cobre y en el material constitutivo de los circuitos magnéticos de las máquinas.

Las sobretensiones atmosféricas se presentan en instalaciones expuestas ya sea directamente o a través de los acoplamientos que presenta la red de distribución, y las sobretensiones de maniobra son debidas en particular a interrupciones de corriente en circuitos inductivos, generadas por la acción de dispositivos como interruptores y contactores.

### **3.8. ESTATOR**

En un estator es importante el diagnosticar: los devanados, el aislamiento entre vueltas, las juntas de soldado entre las espiras y el núcleo del estator o laminaciones. Más específicamente, algunas de las fallas que puede sufrir un estator son:

#### **3.8.1. Cortocircuito entre espiras o espira-tierra**

El corto circuito entre espiras puede ser consecuencia de que coincidan casualmente dos puntos defectuosos del aislamiento de los alambres o resultar de defectos provocados simultáneamente en dos alambres que están lado a lado. Debido a esto, se manifiestan corrientes desiguales en las tres fases que degradan el aislamiento, aumentan la temperatura y eventualmente dañan el motor.

#### **3.8.2. Cortocircuito entre fases**

Es aun más grave que el corto entre espiras, ya que un corto de este tipo acelera rápidamente la destrucción del motor. Esta es una de las fallas cuya detección no se puede hacer simplemente con un megger y que podría ocasionar un daño total del motor de no ser detectada a tiempo.

Para esto se utiliza una prueba estática que involucra mediciones de inductancia entre fases, en la cual se envían señales de CA a alta frecuencia, y se calcula un desbalance inductivo, que de estar presente, implica que las fases producen campos magnéticos desbalanceados y que muy probablemente hay cortos. También como parte de la prueba se toman valores de resistencia, si se excede un valor predeterminado indica que pueden existir conexiones de alta resistencia en el circuito hacia el motor o en las juntas de soldado.

También se puede hacer uso de una prueba dinámica con motor energizado que identifica una falla en el estator tomando mediciones de voltaje y corriente por fase y calculando la impedancia en cada una. Si una fase tiene problemas en los devanados, el desbalance de impedancia aumenta. [22]

Esta clase de falla en el aislamiento es típicamente causada por la presencia de contaminantes, materiales abrasivos, vibración o picos de voltaje.

### 3.8.3. Variaciones térmicas

En general los usuarios y fabricantes de motores tienen buen conocimiento de los daños que pueden ocurrir debido al sobrecalentamiento de los sistemas de aislamiento. El bloqueo del ventilador en un motor puede causar sobrecalentamiento, así como también las sobrecargas a las que se vea expuesto el motor. Este último punto es el motivo causante de buena parte de los daños de la parte eléctrica en motores de inducción. Para controlar este problema, pueden ser instalados sensores en posiciones estratégicas del estator con el fin de poder monitorear la temperatura, y de esta forma poder prevenir el sobrecalentamiento. Por otro lado, la rotura de barras y la ralladura de los anillos del rotor también son responsables por el sobrecalentamiento de la máquina, con una consecuente reducción del par y un aumento en el nivel de vibraciones. Este problema puede

ser detectado de varias formas (análisis de vibración, análisis de corriente, o por simple inspección visual si el rotor es separado del estator).

#### 3.8.4. Apertura de una fase de un devanado trifásico

La apertura de una fase de alimentación de un motor como consecuencia del daño de un fusible, un contacto abierto, una línea interrumpida o malas conexiones, es causa de falla de los devanados. Se produce un desequilibrio de corrientes, si la carga es relativamente grande se sobrecargan algunas de las fases lo que puede provocar sobre-temperaturas y un daño del aislamiento.

#### 3.8.5. Sobrecarga

Esta condición ocurre cuando el motor no tiene la capacidad para mover la carga conectada. Una sobrecarga prolongada del motor puede elevar la temperatura de los devanados más allá de los límites correspondientes a su clase de aislamiento y provocar fallas del mismo, lo que afecta la vida útil del equipo.

#### 3.8.6. Bloqueo del rotor o frenado contracorriente

Un deterioro térmico importante del aislamiento de los devanados de un motor es causado normalmente por corrientes altas en los devanados como consecuencia del bloqueo o semibloqueo (falla en los rodamientos) del rotor. Excesivos arranques o cambios de sentido de rotación (frenado contracorriente) también puede producir este tipo de fallas.

#### 3.8.7. Bobinados del estator sueltos

Si los bobinados eléctricos del estator están ligeramente sueltos, los niveles de vibración a dos veces la frecuencia de la red, aumentarán. Este tipo de fallas es

muy destructivo, ya que daña el aislamiento de los conductores, provocando cortocircuitos entre los devanados, incluso a tierra y fallo del estator.

#### 3.8.8. Fallas en los rodamientos

Las fallas en los rodamientos son de las más comunes en los motores, se manifiestan por vibraciones de alta frecuencia, que en las etapas iniciales pueden estar en un rango entre 1 y 20 kHz, sin embargo a medida que el daño es mayor las frecuencias van disminuyendo. Una vez detectada la falla, el rodamiento debe ser reemplazado, debido a que la falla seguirá incrementándose.

Las causas más comunes de fallas en los rodamientos son: carga excesiva, falta de alineación, defectos de asientos del eje y/o de las perforaciones en el alojamiento, montaje defectuoso, ajuste incorrecto, sellado deficiente, falsa brinelación (deformación bajo carga) y lubricación inadecuada o incorrecta.

#### 3.8.9. Obstrucción del sistema de ventilación

El calor generado en el rotor y estator se disipa al exterior por medio de un sistema de ventilación, el cual, si por alguna circunstancia se encontrara obstruido o dañado, causaría un sobrecalentamiento en los bobinados del estator. Es importante recalcar la necesidad de utilización de un sistema de ventilación adicional si el motor opera con sobrecalentamiento en régimen normal.

### **3.9. ROTOR**

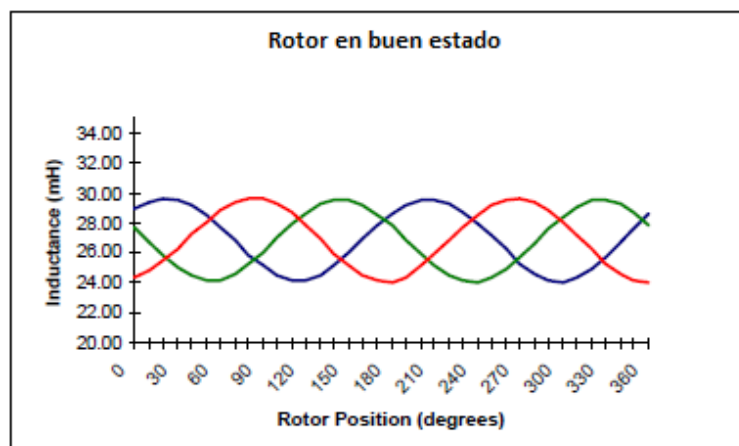
Cuando se habla de la condición de un rotor se deben de revisar: las barras, las laminaciones y los anillos de corto circuito. Una barra rota por ejemplo, genera un calor intenso en la zona de ruptura y puede destruir el aislamiento cercano a las laminaciones y colapsar el devanado del estator.

Este problema de rotura o fisura de las barras del rotor y/o los anillos, es característico de motores asíncronos que tienen que arrastrar cargas con una gran inercia. Para su control, se verifican las soldaduras de barras y anillos por medio del uso de tintas penetrantes, ultrasonido o una inspección visual.

También existen pruebas estáticas y dinámicas para diagnosticar el estado del rotor. Por ejemplo la prueba del “Rotor Influence Check” (RIC) es estática y relaciona el magnetismo entre el rotor y el estator. La prueba se realiza al rotor en incrementos específicos (determinados por el número de polos del motor) y tomando la lectura en el cambio de inductancia para cada fase.

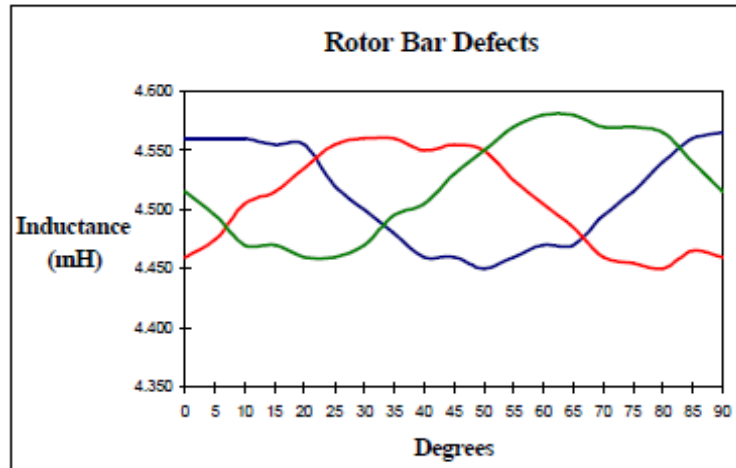
El RIC de un motor normal tiene la forma de la figura 4, mientras que el RIC de un rotor con barras rotas muestra valores de inductancia erráticos y periódicos causados por la distorsión del flujo alrededor de la barra rota, como se muestra en la figura 5. [22]

**Figura 4.** Rotor en buen estado según RIC.



Fuente: Ver referencia [22]

**Figura 5.** Rotor con barras rotas según RIC.



Fuente: Ver referencia [22]

### 3.9.1. Sobrecarga térmica

Es un problema bastante común en motores de inducción, con la ventaja de que puede ser fácilmente detectado y corregido. Puede ocurrir durante el arranque, en régimen permanente o en condiciones de rotor bloqueado, siendo esta última la condición responsable por los mayores daños en el rotor. Las causas más comunes de falla por sobrecarga térmica son: gran número de arranques consecutivos que ocasionan altas temperaturas en las barras y los anillos del rotor, rotor bloqueado debido a grandes cargas impuestas en el eje del motor, fricción entre estator y rotor debido a fallas en el sistema de rodamientos o condiciones de altas vibraciones, rotura de barras del rotor debido a la fatiga, ventilación insuficiente.

### 3.9.2. Desbalance térmico

El desbalance térmico puede tener su origen ya en el proceso de fabricación del rotor o puede ocurrir debido a condiciones de operación que traspasen los límites de trabajo del mismo. Las causas más comunes de fallas por desbalance térmico

son: arranques frecuentes del motor, pudiendo esto ocasionar diferentes temperaturas en las barras del rotor, transferencia de calor desigual entre el centro y las barras del rotor, gradientes de temperatura debido a la circulación de corriente desigual generada por rotura de barras.

### 3.9.3. Desalineación en acople de ejes

La desalineación es una condición en la que los centros de un par de ejes acoplados no coinciden. La mayor parte de casos de desalineación son una combinación de desalineación paralela y angular. El diagnóstico, como regla general, se basa en una vibración dominante a dos veces la velocidad de giro.

La desalineación puede ser causada por diversas condiciones como: posición relativa de los componentes que se altera después del montaje, distorsión debido a fuerzas en tuberías, distorsión en soportes flexibles debido a torque, expansión de la estructura de la máquina debido al alza de la temperatura, el frente del acoplamiento no está perpendicular al eje del rotor y ensamblado impreciso de componentes como motores, bombas, etc.

### 3.9.4. Desbalance mecánico

El desbalance mecánico es una de las causas más comunes que producen vibraciones, el desbalance produce oscilaciones importantes en el par instantáneo requerido por el motor, produciendo la fatiga de los elementos de transmisión tales como correas, poleas, chavetas, rodamientos y ruedas dentadas.

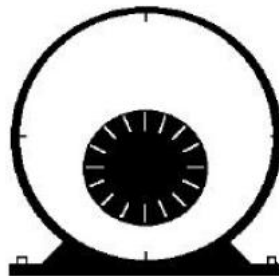
Algunas fuentes que pueden producir desbalance son: aglomeración desigual de polvo en los alabes de un ventilador, falta de homogeneidad en distintas partes, excentricidad del rotor, defectos constructivos, distribución desigual en las barras de rotor o en el enrollado, erosión y corrosión desigual, etc.

### 3.9.5. Excentricidad

El rotor de un motor/generador debe estar centrado, si el entrehierro que envuelve al rotor no está bien distribuido en los 360° del motor, se producen campos magnéticos desiguales, lo que a la larga, resultará en una falla del aislamiento y de los rodamientos.

Existen básicamente dos tipos de excentricidad: la *estática* y la *dinámica*. En la excentricidad estática el rotor está descentrado pero fijo en un lugar. Generalmente este tipo de problemas es causado por un inadecuado alineamiento o por que la carcasa del motor fue torcida cuando se instaló en su base. La figura 6 muestra como es la excentricidad estática.

**Figura 6.** Excentricidad estática.



Fuente: Ver referencia [22]

En la excentricidad dinámica el rotor se balancea dentro del estator, lo que hace que la inductancia varíe. La excentricidad dinámica es producida, generalmente, por una deflexión en el eje y se presenta en la figura 7.

**Figura 7.** Excentricidad dinámica.



Fuente: Ver referencia [22]

## **4. TAREAS DE MANTENIMIENTO PARA MOTORES ELÉCTRICOS TRIFÁSICOS ASÍNCRONOS**

Como hemos visto, existe un gran número de fallas que se pueden presentar en los motores de inducción y por ende de tareas de mantenimiento que se pueden aplicar a los mismos. Por esto, lo que se busca es definir un plan de mantenimiento eficaz que reúna solamente las tareas realmente necesarias y que mejor se ajusten a cada proceso en particular.

A continuación se muestra una descripción de las tareas de mantenimiento más comunes que se aplican a los motores eléctricos en la industria actual (se aclara nuevamente que el objetivo NO es aplicarlas todas, sino escoger por medio del AMFE las que mejor satisfagan las necesidades de cada proceso):

### **4.1. INSPECCIÓN CON LOS SENTIDOS Y LIMPIEZA**

Que aunque es una tarea que depende totalmente de la experiencia de la persona encargada de llevar a cabo la misma y por ende, puede ser bastante subjetiva, puede resultar ser una inspección rápida, que no requiere de mayores recursos y que puede brindar buenos resultados. En esta tarea se puede verificar una gran cantidad de factores como: desgaste, corrosión, el estado de los soportes, el estado físico y funcionamiento del ventilador, la temperatura, el nivel de vibraciones o ruidos anormales, también verificar y limpiar rejillas y ranuras de ventilación, verificar el estado físico de los tableros eléctricos, circuitos de arranque, etc.

#### **4.1.1. Inspección y limpieza de las bobinas**

A parte de las mediciones de la resistencia de aislamiento, las bobinas pueden ser sometidas a inspecciones visuales completas en intervalos frecuentes, anotando y reparando cualquier daño o defecto observado. Hay que verificar que estén libres de suciedad, aceite, polvo metálico, contaminantes, etc. [43]

#### 4.1.2. Agua o humedad

Se debe verificar que no exista presencia de agua o humedad en el motor, especialmente chequear que las conexiones eléctricas no estén expuestas a las mismas. Esto puede causar cortos en el motor y daño del bobinado (aún cuando el motor este hecho para soportar agua, existen límites para cuanto tiempo y cuánta agua puede aguantar un motor).

#### 4.1.3. Base del motor

Se debe verificar que todos los tornillos de sujeción estén ajustados y que no tengan corrosión (si la tienen hay que reemplazarlos inmediatamente debido a que si no están sueltos, lo estarán en poco tiempo y gradualmente causaran desalineación). Verificar que la base no tenga ningún daño o corrosión y que el suelo no esté erosionado o agrietado, ya que estas situaciones también causaran desalineación y vibración que serán perjudiciales para el equipo.

#### 4.1.4. Ajuste de fijaciones

El ajuste de todas las fijaciones debería comprobarse con regularidad. Se debe prestar especial atención a la cementación, los pernos de anclaje y las piezas del rotor, que deben permanecer correctamente ajustadas en todo momento. Un ajuste defectuoso de estas piezas puede ocasionar que se produzca un serio daño en toda la máquina.

#### 4.1.5. Revisión de componentes y conexiones

Revisión de todos los accesorios, protecciones y conexiones del motor y asegurar su correcto funcionamiento. Verificar que las conexiones estén bien aisladas y el estado físico del cableado en general. Verificar la condición de la caja de bornes. Verificar el circuito de las resistencias de arranque (conductores y resistencias) en caso de que exista. Revisar conexiones encintadas, mal empalmadas, quemadas, etc. (Por ejemplo, si una de las líneas del motor se desconectara mientras el motor se encuentra en movimiento, se consumiría un mayor amperaje y si no se activa alguna protección contra sobrecarga, se quemarían las 2 bobinas que se encuentran trabajando).

#### 4.1.6. Limpieza general

Los motores deben ser mantenidos limpios, exentos de aceites, polvo y cualquier otro residuo sólido indeseable. Para limpiarlos, se debe utilizar cepillos o trapos limpios de algodón. Si el polvo no es abrasivo, se debe emplear un soplete de aire comprimido, soplando la suciedad de la tapa deflectora y eliminando toda acumulación de polvo contenida en las aletas del ventilador y en las aletas de refrigeración. [42]

Se debe limpiar el área de entrada y salida del ventilador con el fin de asegurar que el flujo de aire no quede bloqueado de ninguna forma.

### **4.2. MANTENIMIENTO DE LOS DEVANADOS DEL ROTOR Y DEL ESTATOR**

“Los devanados de las máquinas eléctricas giratorias están sujetos a tensiones térmicas, mecánicas y eléctricas. Los devanados y el aislamiento se envejecen y se deterioran gradualmente debido a estas tensiones. Por tanto, la vida de una máquina suele depender de la duración del aislamiento”. [29]

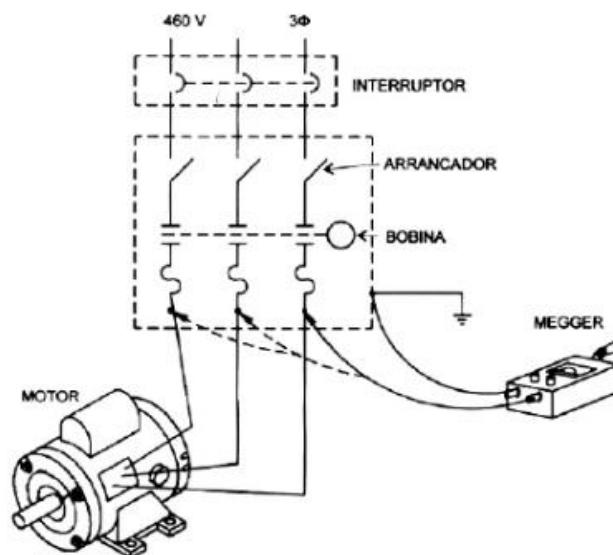
Las diferencias de temperatura significativas en distintos puntos del cuerpo del motor pueden ser un signo de daño en los devanados.

#### 4.2.1. Inspección periódica de los niveles de aislamiento

Puede consistir en abrir el motor y revisar el barniz que aísla las bobinas entre sí o realizar una medición del aislamiento, utilizando un megohmetro o “megger”, que es un dispositivo que realiza mediciones de resistencia con la ayuda de un generador que proporciona tensiones más elevadas que las tensiones de alimentación. Este equipo se utiliza cuando el motor está desenergizado.

Generalmente las mediciones más que una lectura de un dato constituyen una interpretación, por ejemplo “una lectura normal entre un bobinado y carcasa, proporciona una lectura habitual de un valor alto de ohmios o que tiende a infinito, una lectura baja indicará la existencia de un daño en el aislamiento (algunas clases de aislamiento pueden dañarse por ejemplo, por lubricante derramado de los rodamientos)”. [29]

**Figura 8.** Diagrama para la prueba de resistencia de aislamiento.



Fuente: Ver referencia [25]

La medición de la resistencia de aislamiento también puede interpretarse con el fin de obtener de manera indirecta, información sobre la humedad y suciedad del mismo. En función de esta información se pueden determinar acciones de secado y de limpieza apropiadas.

#### 4.2.2. Verificar que no exista elevación de temperatura

Se puede verificar la temperatura en bobinas, rodamientos y sistemas de refrigeración por medio de sensores de temperatura o de una cámara termográfica (como se verá más adelante).

Una subida de temperatura por encima del límite de alarma puede estar ocasionada por diferentes factores. Para el caso de puntos calientes en rodamientos se puede tener aumento de pérdidas por fricción, desalineación, falta o exceso de lubricación, entre otros. Mientras que para altas temperaturas en el medio del motor se pueden tener daños en el bobinado o disminución de la capacidad de refrigeración del equipo.

### **4.3. LUBRICACIÓN DE RODAMIENTOS**

Para la buena lubricación se debe utilizar el aceite o grasa recomendado por el fabricante (o por un especialista en lubricación que este en la capacidad de definir u homologar lubricantes para los diferentes equipos), en la cantidad correcta.

Para los rodamientos que requieren grasa, hay que quitar o expulsar toda la grasa usada antes o durante la aplicación de la grasa nueva. Generalmente, el espacio total para la grasa se debe llenar al 50% de su capacidad para evitar sobrecalentamiento por el aumento en la resistencia al movimiento que produce el exceso de grasa. [29]

Un exceso en la cantidad de grasa aplicada también puede ejercer una presión sobre los sellos o retenedores de los rodamientos que puede llegar a destruirlos, por lo cual, eventualmente la grasa puede ingresar en el bobinado y causar deterioro del aislamiento. O simplemente, la grasa se deteriorará de forma acelerada y los rodamientos fallarán de manera prematura.

Para los rodamientos lubricados con aceite hay que comprobar el nivel y la libre rotación de los anillos después de poner en marcha el motor.

Finalmente se debe verificar la ausencia de fugas de lubricante al exterior.

#### 4.3.1. Intervalos y procedimientos de lubricación

Generalmente los fabricantes de motores proveen todas las recomendaciones relacionadas con los intervalos y procedimientos de lubricación, cantidad de grasa y los rodamientos usados en sus equipos. Además, casi siempre, el periodo de lubricación y el tipo de rodamientos para cada motor están escritos en la placa de identificación colocada sobre ellos.

En el anexo C se puede ver un ejemplo de este tipo de tablas informativas.

#### **4.4. ANÁLISIS DE LOS NIVELES DE RUIDO Y VIBRACIONES**

Los niveles altos o el aumento de la vibración indican cambios en el estado de la máquina. Los niveles normales varían ampliamente en función de la aplicación, tipo y cimentación de la misma.

Algunos motivos típicos que pueden ocasionar niveles de ruido o vibración alta son: “alineación, desgaste o daños en rodamientos, vibración desde la maquinaria

conectada, tornillos de anclaje o ajuste sueltos, desequilibrio del rotor, etc”. [29]

“Normalmente se recomienda que el ruido en los motores sea observado en intervalos regulares de 1 a 4 meses. Esto se puede hacer por medio de una inspección utilizando los sentidos (como se mencionó antes), por ejemplo colocando una mano en distintos puntos del motor, o a través de un oído bien entrenado que sea capaz de distinguir la aparición de ruidos anómalos”. [42]

Sin embargo, existen formas más confiables de hacer esto con la ayuda de dispositivos y técnicas especiales de mantenimiento predictivo como el uso de un medidor de vibraciones básico, conocido en inglés como “vibration pen” con el cual se pueden obtener lecturas de las vibraciones en el plano horizontal (para motores montados horizontalmente) que es en el que usualmente aparecen los mayores niveles de vibración. O por medio de la toma y el análisis del espectro total de vibraciones en el equipo (para mayor profundidad en este tema se puede ver la sección 5.3 de este libro).

#### **4.5. ANÁLISIS DE LAS CORRIENTES Y TENSIONES EN EL EQUIPO**

Esta tarea se puede realizar de dos maneras. Una en la que simplemente se analizan las corrientes y tensiones de manera cuantitativa con el fin de comprobar situaciones como que el motor no esté consumiendo una corriente mayor que la de placa, que no existan desbalances de tensiones, corrientes de fuga a tierra, etc. Esto debido a que por ejemplo cuando se presenta una sobrecarga, el motor demanda más corriente, lo cual incrementa la temperatura del mismo, y reduce la vida útil del aislamiento.

La otra manera es más compleja y requiere de personal capacitado para poder ser llevada a cabo correctamente. Es el análisis espectral de corriente más conocido

como MCSA (Motor Current Signature Analysis) por sus siglas en inglés. El cual permite identificar problemas como: roturas de barras del rotor, rotura de anillos del rotor, cortocircuito de las bobinas del estator, excentricidad del rotor y fallas en rodamientos por medio del análisis del espectro de frecuencias de la señal de corriente del motor (para mayor profundidad en este tema se puede ver la sección 5.4 de este libro).

#### **4.6. SUSTITUCIÓN DE RODAMIENTOS**

Puede ser utilizada como una tarea de mantenimiento preventivo (programar cambios de rodamientos periódicos) o correctivo (realizar el cambio una vez falle el rodamiento en uso), y es una de las principales tareas que se aplican a los motores eléctricos.

Generalmente, el desmontaje de los rodamientos no es difícil, desde que se usen las herramientas adecuadas y se sigan las recomendaciones dadas por los fabricantes. [42]

Es esencial que el montaje de los rodamientos sea efectuado en condiciones de rigurosa limpieza y por personas competentes, para asegurar un buen funcionamiento y evitar daños. [42]

#### **4.7. TAREAS DE MANTENIMIENTO PARA MOTORES DE ROTOR DEVANADO**

##### **4.7.1. Verificación del desgaste de las escobillas y los anillos colectores**

Básicamente consiste en verificar su estado físico y que estén haciendo contacto correctamente. Se debe verificar que no estén presentes situaciones como:

escobillas adheridas a sus portaescobillas, escobillas demasiado sueltas, conexión suelta de un borne de escobilla, contacto imperfecto, presión incorrecta o desigual o deterioro en las superficies de deslizamiento de los anillos deslizantes.

#### 4.7.2. Cuidado de los anillos deslizantes

“Las superficies deslizantes de estos anillos deben mantenerse suaves y limpias. Los anillos deslizantes deben inspeccionarse y las superficies de aislamiento limpiarse, esto debido a que el desgaste de las escobillas produce polvo de carbón que crea puentes conductivos con facilidad entre las superficies de aislamiento”. [29]

#### 4.7.3. Desgaste de los anillos

“En caso de que los anillos deslizantes se hayan vuelto ásperos o irregulares, deberían ser sustituidos o por lo menos, tratados en un torno. En caso de que los anillos deslizantes se gasten o estén quemados, se debe montar unos nuevos. Se puede medir la excentricidad de los anillos deslizantes usando un calibrador indicador graduado”. [29]

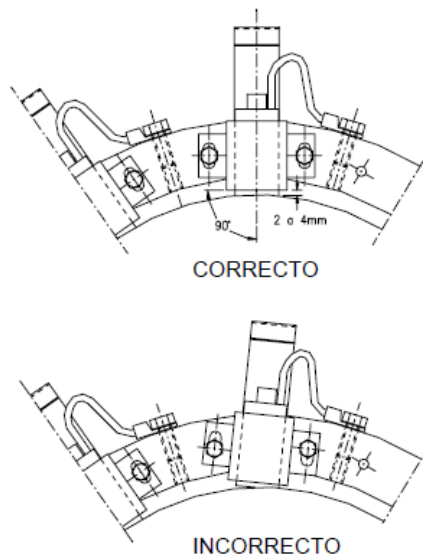
#### 4.7.4. Presión de las escobillas

Se debe verificar que la presión de las escobillas se distribuya regularmente sobre toda la superficie de contacto, es decir, que la escobilla se adapte a la curvatura del anillo deslizante, esto con el fin de que quede asegurada una distribución uniforme de la corriente y un bajo desgaste de las escobillas.

#### 4.7.5. Porta escobillas

Verificar que los porta escobillas estén instalados en sentido radial con referencia al anillo colector, y separados 4 mm como máximo, de la superficie de contacto, con la finalidad de evitar ruptura o daños de las escobillas (figura 9). [42]

**Figura 9.** Distancia entre porta escobas y la superficie del contacto.



Fuente: Ver referencia [42]

#### 4.8. MANTENIMIENTO CORRECTIVO

Vale la pena mencionar que en muchos casos, los propios fabricantes brindan mucha información con respecto a los problemas que se pueden presentar con los motores eléctricos, sus causas y sus soluciones. Un ejemplo de estas tablas se muestra en el anexo D. Además en el anexo A se da la definición de este tipo de mantenimiento.

## **5. TÉCNICAS DE MANTENIMIENTO BASADO EN LA CONDICIÓN, CBM**

### **5.1. TERMOGRAFÍA**

La temperatura es uno de los primeros parámetros observables que pueden indicar la condición de operación de un equipo. Todos los procesos industriales operan con energía mecánica, eléctrica o química, las cuales, constantemente son convertidas de una a otra y el calor es un subproducto que se genera al darse este tipo de conversiones.

Asociaciones como la IEEE, ANSI, IEC y la gran mayoría de fabricantes de equipos publican los rangos de temperatura de operación para los mismos. En otras palabras se puede decir que se ha aceptado a la temperatura como un fiel indicador de la condición de los equipos y componentes y por ende, de su confiabilidad y duración.

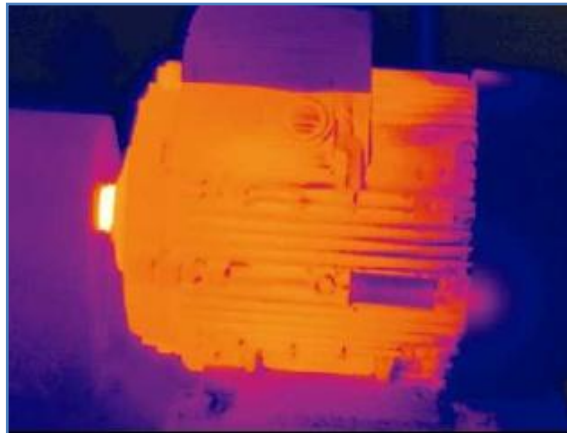
Es por estas razones que aparece la termografía, una técnica que permite medir temperaturas exactas, a distancia y sin necesidad de contacto físico con el objeto a estudiar, mediante la captación de la radiación infrarroja del espectro electromagnético, teniendo en cuenta que la principal fuente de radiación infrarroja es el calor o radiación térmica. Es decir, que cuanto más caliente este un objeto mayor cantidad de radiación infrarroja emitirá.

Esta técnica se realiza utilizando cámaras termográficas o de termovisión, que permiten convertir la energía infrarroja radiada en información sobre temperatura, por medio de la cual se puede elaborar un análisis del estado actual de los equipos electro - mecánicos y proceder a desarrollar una acción de mantenimiento en caso de ser necesario.

Entre las ventajas de la termografía se pueden destacar: baja peligrosidad para el operario por evitar la necesidad de contacto con el equipo, no es intrusiva (por ende no afecta de ninguna forma al equipo que está siendo analizado), no se necesita detener el proceso para llevar a cabo el análisis, se realiza en tiempo real, se pueden determinar los puntos deficientes y de posibles fallos en una línea de proceso, reduce el tiempo de reparación por la localización precisa del fallo y ayuda al seguimiento de las reparaciones previas.

A continuación se muestra un ejemplo de una termografía tomada a un motor de AC, donde se observa que el eje se encuentra a la mayor temperatura.

**Figura 10.** Ejemplo de aplicación de termografía a un motor de AC.



Fuente: Ver referencia [39]

Los mapas térmicos producidos por instrumentos de imágenes térmicas infrarrojas son llamados “termogramas”. Para entender e interpretar los mismos, se debe estar familiarizado con los fundamentos de la temperatura y la transferencia de calor, el flujo de calor infrarrojo irradiado, características de los cuerpos (cuerpos negros, cuerpos grises y cuerpos no grises) en cuanto a la forma como emiten, absorben o transmiten la radiación (emisividad, reflectividad, transmisibilidad) y las características de los medios de transmisión. Sin embargo, no se explicará esta teoría en este libro y se deja como material de investigación para los lectores que

así lo deseen (se puede encontrar gran cantidad de información acerca de estos temas, la termografía y sus aplicaciones online o en diferentes libros especializados).

#### 5.1.1. Análisis termográficos

En termografía el saber solo como se toma una imagen térmica no es suficiente para realizar un análisis preciso y dar valor agregado al proceso de mantenimiento. Se debe ser capaz de analizar una imagen y comprender las consecuencias de lo que se ve.

Una imagen termográfica brinda información que una imagen normal no proporciona. Por ejemplo que un motor está en funcionamiento o dejó de estarlo hace corto tiempo, que la zona donde está el rodamiento se encuentra a una temperatura elevada o que una de las fases de alimentación tiene un contacto de alta resistencia.

Generalmente en un termograma las áreas más oscuras son aquellas que irradian menos radiación térmica, lo que significa que son las zonas más frías y las áreas más brillantes significan lo contrario, más radiación y por ende, zonas más calientes.

##### 5.1.1.1. Interpretación de una imagen térmica

Cuando se observa una imagen térmica, obviamente se utiliza la misma referencia que para la imagen visual. Esto es algo que nuestras mentes necesitan cambiar y para ello se requiere de práctica y entrenamiento y puede resultar en un proceso que no acaba nunca. Puede darse que al volver a observar una imagen tomada hace varios años, se descubran cosas que en su momento se pasaron por alto,

simplemente porque se ha aprendido a desarrollar una nueva forma de ver e interpretar las imágenes térmicas.

Una característica de gran importancia (y que muchas veces dificulta los análisis) en las imágenes infrarrojas es que son una combinación de emisión del objeto y reflexión del entorno (la imagen visual, por otro lado, está compuesta principalmente por la radiación reflejada procedente del entorno, luz procedente de otra fuente que es reflejada en la superficie de los objetos). Esta parte reflejada normalmente es un estorbo y es algo que se trata de compensar, ya que lo que realmente interesa es la propia emisión del objetivo. Es por esto que se prefieren objetos con una emisividad elevada (que no reflejan mucho).

Hay que tener presente que un termograma es una representación de la radiación térmica emitida, transmitida y reflejada por los objetos. No se puede caer en el error de suponer que es una imagen de la distribución de temperaturas, ya que puede suceder que un termograma en el que aparentemente se muestran grandes diferencias de temperatura en diferentes zonas de una superficie objetivo, lo que realmente se muestra sea debido a una diferencia de alguna propiedad de los materiales que la conforman (como la emisividad), y que la temperatura superficial a lo largo de todo el objetivo realmente es la misma.

Es de esta situación que surge el concepto de temperatura aparente, que se define como la lectura no compensada a partir de una cámara infrarroja, que contiene toda la radiación incidente sobre el instrumento, independientemente de su fuente. Hay que mencionar que la imagen térmica siempre será una imagen de temperatura aparente.

La emisividad entonces, juega un papel fundamental en la termografía. Los objetos aparecen en los termogramas no solo de acuerdo a su temperatura, sino también de acuerdo a la emisividad que tengan. En otras palabras, la temperatura

aparente de un objetivo de alta emisividad será cercana a su temperatura real; por lo tanto, se puede confiar en lo que se ve. Mientras que la temperatura aparente de un objetivo de baja emisividad será cercana a la temperatura aparente de los cuerpos que están a su alrededor y NO se podrá confiar en lo que se ve (puede que un cuerpo de baja emisividad esté más caliente que sus alrededores pero se vea más frío o viceversa).

#### 5.1.1.2. Herramientas de las cámaras para el análisis de una imagen térmica

El análisis de una imagen térmica implica a menudo el estudio de patrones o distribuciones térmicas. Estos patrones son a veces difíciles de apreciar, por lo que el instrumento de medición contiene varias utilidades que pueden ayudar a comprenderlos mejor.

A continuación se muestran algunas de las herramientas que normalmente se utilizan para realizar el análisis de los termogramas.

- Isotermas

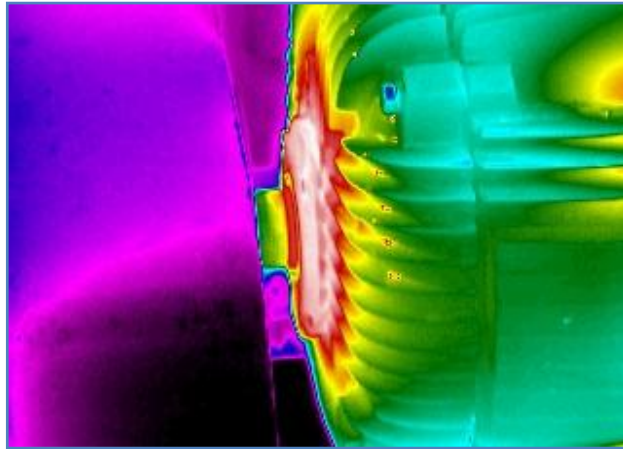
Las isotermas sustituyen algunos colores de la escala por otros de elevado contraste. De esta forma marcan un intervalo de igual temperatura aparente que se puede desplazar hacia arriba o hacia abajo en la escala y puede ser ensanchado o estrechado según se quiera.

- Gradiente térmico

Es una variación de temperatura gradual con la distancia. Un gradiente térmico indica a menudo la existencia de transmisión de calor por conducción, ya que muchos de los objetivos en termografía son sólidos opacos, y en ellos la transmisión de calor solo se produce por conducción. Es por esto por lo que es

tan importante aprender a analizarlos. Un gradiente térmico nos muestra el sentido del flujo de calor, y nos dirige así, hacia la fuente del mismo.

**Figura 11.** Ejemplo de gradiente térmico en un motor eléctrico.



Fuente: Ver referencia [40]

En este caso por ejemplo, se observa el gradiente térmico en un motor eléctrico generado por la existencia de algún problema en el rodamiento del lado de la carga, La zona de este rodamiento se calienta de manera excesiva y este calor se transmite o conduce a las zonas aledañas y va disminuyendo conforme aumenta la distancia.

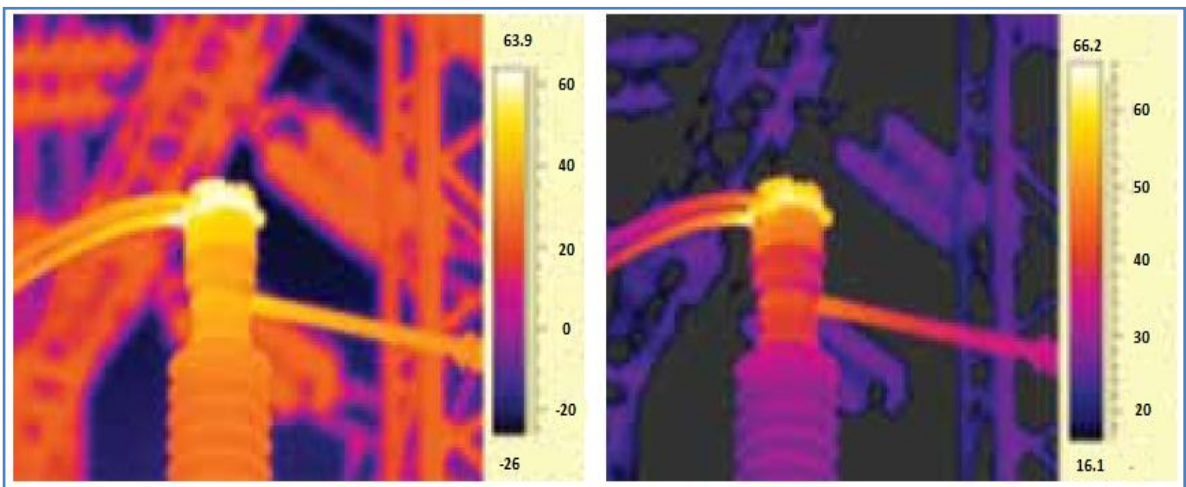
- Ajuste térmico

Consiste en ajustar la escala de colores sobre el cuerpo que se quiere analizar, con el objetivo de optimizar el contraste sobre el mismo. Para realizar este ajuste se utilizan los controles de nivel y campo que poseen todas las cámaras de forma que todos los colores de la barra de color cubran esa parte de la imagen, y solo esa parte. Las zonas menos interesantes de la imagen pueden quedar fuera de escala, y por lo tanto, normalmente se verán como negras o blancas.

Como ejemplo, en la siguiente figura tenemos un interruptor de alta tensión con una anomalía. La cámara ha encontrado que la temperatura más baja es de -

26°C y por tanto el campo se ha abierto hasta cubrir dicha temperatura. Esto significa que el contraste en la parte de la imagen que nos interesa es demasiado pobre. En la imagen de la derecha el campo es más estrecho y el nivel ligeramente más alto lo que da mayor contraste. Esta imagen es más fácil de analizar, porque la imagen térmica está mucho más contrastada (todos los objetos que no son de interés prácticamente no se muestran en el termograma).

**Figura 12.** Ejemplo de ajuste térmico en un interruptor de alta tensión.



Fuente: Ver referencia [16]

- Paletas de color

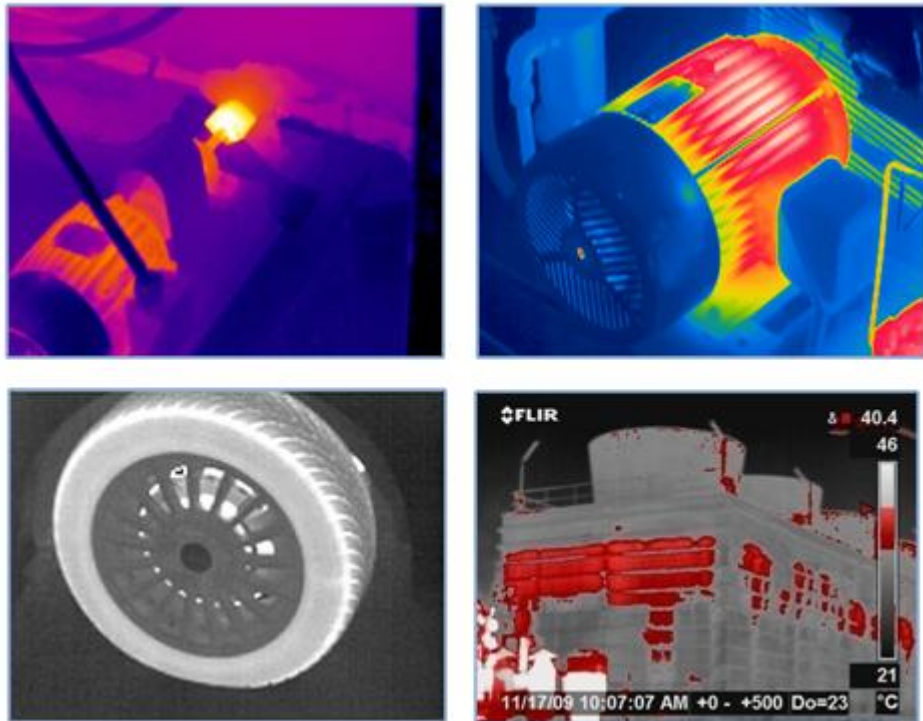
Las paletas de color de la imagen asignan diferentes colores para marcar niveles específicos de temperatura aparente. Las paletas pueden dar mayor o menor contraste, dependiendo de los colores que se utilicen y pueden llegar a presentar imágenes con un máximo de aproximadamente 256 colores o grises al mismo tiempo.

No se debe escoger una paleta de colores porque pareció buena en una ocasión y a partir de ese momento utilizarla siempre. Se debe cambiar durante el análisis

para ver si produce algún cambio en la imagen, ya que hay ocasiones en las cuales se obtienen mejores resultados con una paleta que con otra.

A continuación se muestran ejemplos de diferentes paletas en las cámaras termográficas:

**Figura 13.** Ejemplos de paletas de colores.

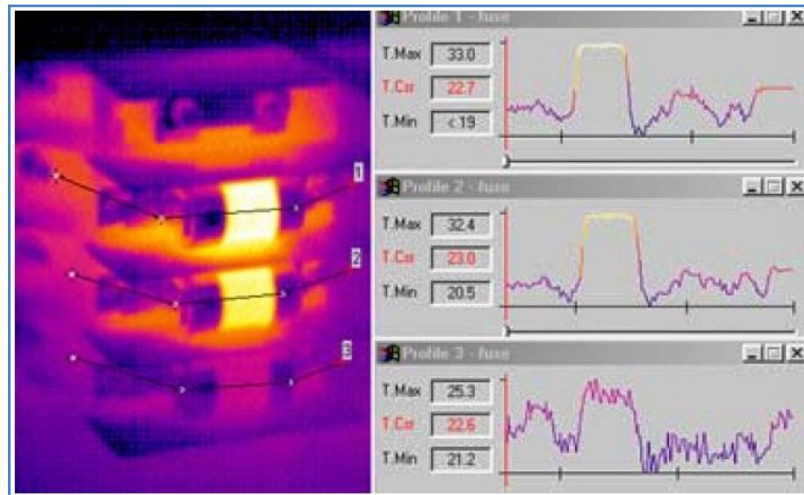


Fuente: Ver referencia [40]

- Perfiles de temperatura

El perfil proporcionará la evaluación de temperatura a lo largo de una línea en la imagen, la cual es seleccionada y dibujada por el usuario según sus necesidades. Esta función simplemente es una gráfica con temperatura en el eje vertical y distancia en el eje horizontal y resulta muy útil cuando se usa adecuadamente.

**Figura 14.** Ejemplo de perfil de temperatura a lo largo de un grupo de elementos.



Fuente: Ver referencia [26]

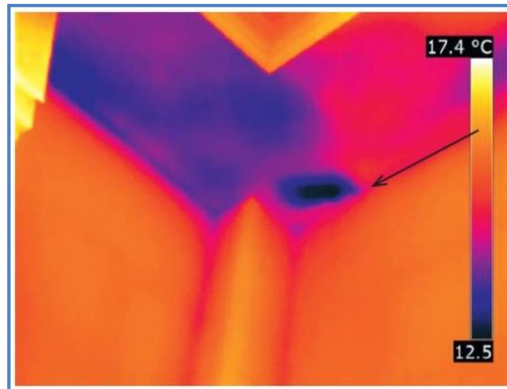
### 5.1.1.3. Análisis cualitativos y cuantitativos

La razón por la que la termografía es una herramienta tan útil y especial es la posibilidad de trabajar con imágenes. El hecho de que se pueda ver una imagen térmica para localizar posibles anomalías es muy importante, ya que una lectura única de temperatura por sí sola aporta mucha menos información.

La *termografía cualitativa* se basa en el análisis visual de la imagen térmica para revelar y localizar la existencia de anomalías y posteriormente evaluarlas, mientras que la *termografía cuantitativa* utiliza la medida de temperatura como criterio para determinar la gravedad o severidad de un problema, y así establecer la prioridad de su reparación. Esto es importante debido a que muchas veces no se cuentan con todos los recursos para reparar inmediatamente todos los problemas potenciales que se encuentran en los procesos. Sin embargo este tipo de termografía no siempre es relevante.

Como ejemplo del análisis cualitativo se puede tomar el termograma mostrado en la siguiente figura.

**Figura 15.** Termograma de una habitación con presencia de humedad.



Fuente: Ver referencia [1]

En este caso se observa un termograma de una habitación en la que hay presencia de humedad. Lo importante en este caso era determinar si había filtración de humedad en la habitación, y de ser así, en donde estaba. El valor de temperatura en este caso es irrelevante, ya que no aporta información de interés para clasificar el problema.

Para el caso de definir cuando se hace necesario un análisis cuantitativo, se puede observar el termograma en la siguiente figura.

**Figura 16.** Termograma de un motor eléctrico.



Fuente: Ver referencia [1]

En este caso, se observa un motor eléctrico cuyo lado de carga se encuentra a una alta temperatura (aproximadamente 70°C), pero surgen las preguntas ¿Es un problema o es parte del funcionamiento normal del equipo?, ¿Es grave?, ¿Debe ser reparado?, para responderlas es necesario tener en cuenta varios criterios que se trataran a continuación.

#### 5.1.2. Criterios de clasificación de fallos

La utilización de criterios para clasificar fallos ofrece una aproximación sistemática al establecimiento de prioridades de reparación. De esta manera se puede establecer un plan de acción que enfoque los recursos disponibles en la solución de los fallos más críticos y no permitirá la mala utilización de los mismos, al enfocar nuestros esfuerzos en situaciones que realmente no lo ameritan.

Concretamente, un buen criterio de clasificación debe cumplir dos cuestiones:

- Debe ser operativo (describir que acción se debe llevar a cabo cuando se cumplen unas condiciones específicas).
- Debe especificar bajo qué condiciones y para qué equipos es válido.

##### 5.1.2.1. Delta T

Es una medida de la diferencia de temperatura entre la temperatura actual del componente estropeado y alguna temperatura de referencia. Esta medida es utilizada para determinar cuándo se presenta una anomalía debido a que la temperatura se aleja del valor “normal”. Para definir lo que se considera como normal se utilizan especificaciones del fabricante o datos históricos.

A continuación se muestra una tabla ejemplo de criterios de clasificación de fallos.

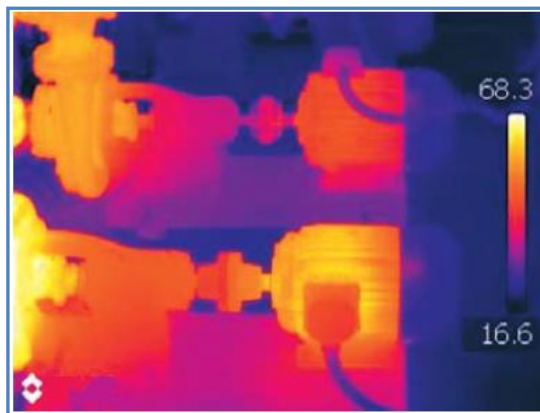
**Tabla 9.** Ejemplo de criterios de clasificación de fallos.

CLASE DE FALLO	DESCRIPCION	EJEMPLO
A	Fallo de gravedad elevada. Se requiere atención inmediata.	Temperatura absoluta del motor por encima de 90°C.
B	Fallo de gravedad media. Se requiere atención tan pronto como sea posible.	Temperatura absoluta del motor entre 70°C y 90°C.
C	Fallo de gravedad leve. Se requiere monitorizado y comprobación, pero se reparará cuando sea conveniente.	Temperatura absoluta del motor entre 50°C y 60°C.

Fuente: el autor.

En algunos casos se pueden usar componentes similares, que trabajen bajo condiciones similares para evidenciar cuando existe un problema. Como ejemplo a continuación se muestra un termograma de dos bombas centrífugas iguales, con cargas iguales, trabajando juntas, que deberían mostrar las mismas temperaturas.

**Figura 17.** Termograma comparativo.



Fuente: Ver referencia [1]

En caso de que no se corra con la suerte de tener un equipo o patrón de referencia para realizar este tipo de comparaciones lo que se necesita son datos históricos.

#### 5.1.2.2. Datos históricos o de referencia

Estos datos de referencia deben ser adquiridos de forma sistemática y consistente, comenzando en el mismo momento en que se quiere aplicar la termografía dentro del programa de mantenimiento.

La situación ideal es disponer de un equipo que se acaba de instalar, o que se acaba de reparar para empezar a recoger los datos de referencia. Se supone que estos equipos estarán funcionando normalmente, y eso es precisamente lo que se quiere.

“Este tipo de datos son fundamentales cuando no se tiene como realizar un análisis comparativo de los termogramas por medio de equipos similares, también cuando no se está seguro de si lo que se está viendo es realmente una anomalía que debe corregirse o si por el contrario, es algo relacionado con el funcionamiento normal del equipo, o cuando no se tiene ningún tipo de experiencia con la determinación de posibles fallos para el tipo de equipo que está siendo blanco del estudio”. [38]

#### 5.1.3. Aplicación en motores eléctricos

Las imágenes térmicas de los motores eléctricos muestran sus condiciones de funcionamiento a través de la temperatura de superficie. Este método de inspección se basa en que los motores, así como la mayoría de los componentes de un sistema mecánico o eléctrico muestran un incremento de temperatura cuando presentan alguna falla.

Lo ideal es realizar comprobaciones de los motores cuando estén trabajando bajo condiciones normales de funcionamiento y recordar que todos los motores están diseñados para funcionar a una temperatura interna determinada.

En todas las placas de características de motores figura la temperatura de funcionamiento normal del motor. Aunque no se pueda observar el interior de un motor con una cámara termográfica, la temperatura de la superficie exterior dará una estimación aproximada de la temperatura interna, ya que a medida que la temperatura interna del motor aumenta, la temperatura exterior también aumenta (basándose en la experiencia de varios autores y especialistas en el tema, se sabe que existe alrededor de 15° C a 20° C de diferencia entre la temperatura de la carcasa y la del devanado del motor y que la misma depende también de la temperatura ambiente). Por ello, un especialista en termografía podrá identificar un flujo de aire insuficiente, un fallo inminente en un rodamiento, problemas de acoplamiento del eje o una degradación del aislamiento del rotor o del estator de un motor a través de imágenes térmicas.

Como ya se mencionó, todas las placas de datos de los motores especifican el máximo incremento de temperatura en el motor con respecto a la temperatura ambiente. La mayoría de los motores están diseñados para funcionar a una temperatura ambiente que no supere los 40°C, aunque esto puede variar considerablemente para distintos tipos de motores y de aislamientos. En general, (y de acuerdo con la capacitación del autor en el nivel I de termografía) se considera que un aumento sostenido de 10°C sobre la temperatura indicada reduce a la mitad la vida útil del motor y conforme este aumento sea mayor, la vida útil del motor seguirá disminuyendo proporcionalmente.

Las inspecciones termográficas de motores eléctricos que se llevan a cabo de forma regular ayudan a identificar los motores que están comenzando a sobrecalentarse (indicio de la existencia de una falla potencial).

El sobrecalentamiento del motor generalmente puede ser producido por: flujo de aire insuficiente, desequilibrio de tensión o sobrecarga, problemas en rodamientos, fallas del aislamiento o mala alineación del eje.

#### 5.1.4. Acerca de la termografía en rodamientos

Una vez más, hay que resaltar que los equipos deben inspeccionarse cuando se encuentren en un estado de funcionamiento estable y tengan su carga normal. Es decir, bajo condiciones normales de funcionamiento.

Los problemas en los rodamientos se suelen encontrar comparando sus temperaturas con las temperaturas de superficie de rodamientos similares que funcionan en circunstancias parecidas. Por ejemplo, capturar y comparar la imagen del otro rodamiento del mismo eje o las temperaturas de los bloques de motores (para motores y rodamientos del mismo tipo). O por medio del establecimiento de temperaturas de referencia que se mencionó anteriormente.

## 5.2. ULTRASONIDO

“El ultrasonido es una vibración mecánica con un rango de frecuencias mayor al audible por el oído humano ( $> 20$  KHz) que se transmite a través de un medio físico y es orientado, registrado y medido con ayuda de un dispositivo especial creado para ese fin”. [13]

“Las ondas ultrasónicas obedecen a las mismas leyes básicas del movimiento ondulatorio de las ondas sonoras de frecuencias más bajas, sin embargo, tienen las siguientes ventajas:

- Las ondas de frecuencias más altas tienen longitudes de onda más cortas, lo cual significa que la difracción o flexión en torno a un obstáculo de dimensiones determinadas se reduce en forma correspondiente. Por lo tanto es más fácil dirigir y enfocar un haz de ultrasonido.
- Las ondas ultrasónicas pueden atravesar sin dificultad las paredes metálicas de tubos y recipientes. Esto quiere decir que el sistema de medición entero puede

montarse externamente al sistema, es decir, es no invasivo. Esto es muy importante con fluidos hostiles, es decir, aquellos con propiedades corrosivas, radioactivas, explosivas o inflamables. Tampoco existe la posibilidad de que ocurra obstrucción con fluidos sucios o con sólidos suspendidos”. [37]

Casi todas las fricciones mecánicas, arcos eléctricos y fugas de presión o vacío producen ultrasonido en un rango aproximado a los 40 KHz de frecuencia con características muy aprovechables en el mantenimiento predictivo, puesto que las ondas sonoras son de corta longitud, atenuándose rápidamente y sin producir rebotes. Por esta razón, el ruido ambiental por más intenso que sea, no interfiere en la detección del ultrasonido. Además, la alta direccionalidad de este método permite la ubicación de la falla con rapidez y precisión.

La aplicación del análisis por ultrasonido se hace indispensable especialmente en la detección de fallas existentes en equipos rotativos que giran a velocidades inferiores a las 300 RPM, donde la técnica de medición de vibraciones se transforma en un procedimiento ineficiente. De modo que la medición de ultrasonido es en ocasiones complementaria con la medición de vibraciones, que se utiliza eficientemente sobre equipos rotativos que giran a velocidades superiores a las 300 RPM. [18]

Un detector de ultrasonido, puede encontrar las fallas mecánicas y eléctricas de una máquina, antes de que el daño ocurra y sea más costosa su reparación; para ello utiliza la generación, propagación y detección de ondas elásticas (sonido) a través de los materiales. Contiene un elemento piezo-eléctrico, cuya función es convertir pulsos eléctricos en pequeños movimientos o vibraciones, las cuales a su vez generan sonido, con una frecuencia que puede llegar a estar en el rango de los megahertz.

Con el propósito de entender exitosamente y/o aplicar esta técnica es necesario tener bases teóricas sólidas en temas como movimiento ondulatorio, efecto Doppler, tipos de ondas (transversales, longitudinales, superficiales) y en general con todo lo que tiene que ver con generación, transmisión y reflexión de ondas ultrasónicas en diferentes medios. Sin embargo, no se explicará esta teoría en este libro y se deja como material de investigación para los lectores que así lo deseen (se puede encontrar gran cantidad de información acerca de estos temas, el ultrasonido y sus aplicaciones online o en diferentes libros especializados).

### 5.2.1. Análisis ultrasónico

El análisis ultrasónico en el sentido amplio es el análisis de las señales acústicas emitidas por un dispositivo o sistema para detectar condiciones indeseables tales como las fallas incipientes, que son el primer aviso de futuras fallas más severas. Las personas a través del sistema auditivo en buenas condiciones físicas, aplican un análisis sónico mental en el rango audible sin estar conscientes de su mecanismo. El reconocimiento de la voz de una persona, el reconocimiento del vuelo de un avión, y el reconocimiento de un desafino en un piano que suena entre otros casos, son algunas formas típicas que las personas usan para realizar un análisis del sonido.

Principios similares pueden aplicarse en la industria, pero aquí la señal recibida debe ser procesada de manera tal que la identificación de una falla pueda ser hecha basándose en un espectro o un conjunto de datos gráfico, en vez de usar una presentación de datos auditivos directamente.

El concepto fundamental es que cualquier sistema en movimiento genera un sonido. Si el sistema está operando normalmente, la señal emitida es la llamada "huella acústica" de ese sistema. Y ya que cualquier anomalía afectará el carácter del sonido emitido, el análisis para detectar posibles fallas se realiza

comparando la conocida huella normal con el sonido que está siendo emitido por el sistema en funcionamiento.

Los instrumentos de ultrasonido en el aire, a menudo denominados "traductores ultrasónicos", proporcionarán información de dos maneras: Cualitativamente, debido a la capacidad de "escuchar" ultrasonidos a través del aislamiento del ruido, y Cuantitativamente, a través de lecturas incrementales de la medida. Esto se logra en la mayoría de traductores ultrasónicos gracias a un proceso electrónico llamado "heterodinación", que convierte con exactitud los ultrasonidos captados por el instrumento a sonidos de rango audible, que los usuarios pueden conocer y reconocer a través de auriculares.

Aunque la capacidad para medir la intensidad sonora y ver los patrones es importante, es igualmente importante ser capaz de "escuchar" los ultrasonidos producidos por diferentes equipos. Esto permite que los analistas sean capaces de discriminar entre diversos sonidos de diferentes equipos y que puedan confirmar un diagnóstico sobre el terreno.

En cuanto a los motores eléctricos, el análisis de ultrasonido se utiliza principalmente para la inspección de los rodamientos y de la lubricación, tal como se verá a continuación.

#### 5.2.2. Monitoreo de rodamientos y lubricación

El ultrasonido proporciona una alerta temprana de posibles fallas que se puedan producir en motores eléctricos y otras máquinas rotativas debido a los rodamientos o a una mala lubricación (del 60 al 80 por ciento de las fallas de rodamientos son relacionadas con la lubricación).

La inspección predictiva y proactiva de los equipos rotativos con un instrumento de ultrasonido tiene muchas ventajas, entre las cuales se pueden destacar las siguientes:

- La alerta temprana de falla en rodamientos.
- La detección de falta de lubricación.
- La prevención de problemas de lubricación.
- El uso de un software especializado que ayuda en el proceso de análisis.

El ultrasonido puede ser utilizado en todas las velocidades de los rodamientos (alta, media y baja). Además, dado que el ultrasonido es una señal de alta frecuencia y señal de onda corta, es posible filtrar los ruidos de fondo de planta (se filtran los ruidos confusos del entorno) y enfocarse en el ruido específico para su inspección. Los métodos básicos de inspección son extremadamente simples y requieren poca capacitación.

Los usuarios de instrumentos analógicos pueden observar los niveles de sonido y al mismo tiempo escuchar la calidad del mismo. Los usuarios de instrumentos digitales tienen opciones adicionales, como el análisis de datos a través de software especializados. Los instrumentos digitales más sofisticados proporcionan todas las características de los programas integrales de soporte de monitoreo de condición:

- Registro de datos: los diferentes tipos de software permiten el uso de tendencias y el ajuste de los parámetros de alarma.
- Transmisión de datos de configuración: para toma de lecturas de ruta extremadamente rápidas.
- Grabación de sonido de la muestra: Presenta el análisis del espectro y presentación de informes.

- Formatos de presentación de informes personalizados que incorporan otros parámetros e imágenes.
- Intercambio de datos: Los paquetes de software funcionan en una red informática.

¿Cómo funciona la inspección de rodamientos por ultrasonido?

Los movimientos mecánicos producen un amplio espectro de sonido. Uno de los principales contribuyentes a la tensión excesiva en las máquinas es la fricción, la cual es detectada por los instrumentos de ultrasonido, y ya que los sonidos producidos por ella se centran en una estrecha banda de frecuencias altas, los instrumentos de ultrasonido detectan los cambios sutiles en la calidad de la amplitud y el sonido producido por el equipo operativo. A continuación, por medio de la heterodinación se llevan estos sonidos normalmente no detectables, hacia el rango audible en el que se escuchan a través de auriculares y pueden observarse en un panel de visualización de tendencias mediante la comparación y el análisis.

Se ha comprobado que el monitoreo por ultrasonido proporciona una alerta temprana de fallas en los rodamientos. Para esto se debe establecer una línea base para cada rodamiento y realizar mediciones rutinarias para identificar los aumentos de decibeles. Una vez hecho esto se pueden identificar diversas etapas de la falla, las cuales se pueden apreciar en la siguiente tabla junto con la acción preventiva recomendada:

**Tabla 10.** Importancia del ultrasonido para el mantenimiento.

<b>Modo de falla del rodamiento</b>	<b>Decibeles sobre la referencia</b>	<b>Acción</b>
Pre-falla o falta de lubricación	8 – 10 db	Lubricar y retomar las lecturas
Primeros síntomas o comienzo de la falla	10 – 12 db	Vigilar en el tiempo
Falla	16 db	Programar su reemplazo (próximo período conveniente)
Falla catastrófica	35 – 50 db	Remover y reemplazar de inmediato

Fuente: Ver referencia [14]

#### 5.2.2.1. Métodos de inspección de rodamientos por ultrasonido

Hay tres métodos para monitorear los rodamientos por medio de ultrasonido:

**Comparativo:** Compara rodamientos iguales, que tengan contextos operacionales similares con el fin de identificar posibles desviaciones.

**Histórico:** Establecer una tendencia en el tiempo de los valores medidos con la ayuda de un software especializado.

**Analítico:** Utilizar un software de análisis espectral junto con una calculadora integrada de fallos.

Con el método histórico es posible programar los niveles de alarma en los puntos de datos, para esto primero se debe establecer una lectura de referencia y a continuación se puede definir por ejemplo una primera alarma (indicación de la falta de lubricación) y una segunda alarma (alerta temprana de fallos en los rodamientos).

### 5.3. ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Según la norma ISO 2041 en relación con la terminología en vibraciones se establece que vibración es toda variación en el tiempo, de una magnitud que describe el movimiento o la posición de un sistema mecánico, cuando esta magnitud es alternativamente mayor o menor que cierto valor promedio o de referencia.

“La vibración mecánica es uno de los parámetros más utilizados universalmente para monitorear la condición de las máquinas, debido a que a través de ellas se pueden detectar la mayoría de los problemas que se pueden presentar.

La base del diagnóstico de la condición mecánica de una máquina mediante el análisis de sus vibraciones se basa en que las fallas que en ella se originan, generan fuerzas dinámicas que alteran su comportamiento vibratorio. La vibración medida en diferentes puntos de la máquina se analiza utilizando diferentes indicadores vibratorios buscando el conjunto de ellos que mejor caractericen la falla.

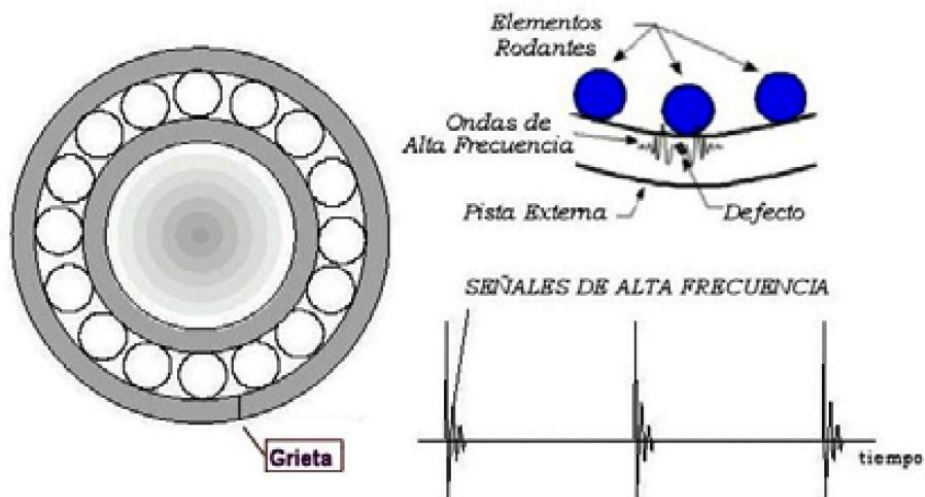
En otras palabras se puede decir que todas las máquinas tienen un nivel de vibración que puede ser considerado normal o inherente a su funcionamiento. Cuando este nivel aumenta y empieza a ser excesivo, es normalmente el síntoma de la presencia de una falla”. [15]

“En la práctica se pueden presentar casos en que se requiere del uso de diferentes indicadores y técnicas de análisis, debido a que problemas diferentes pueden presentar síntomas similares. Para ilustrar la situación, un cambio en la amplitud de la componente vibratoria a 1x rpm (componente de frecuencia que equivale a 1x la velocidad del rotor en rpm) puede tener su origen en problemas como desequilibrio, desalineación, holguras mecánicas, eje agrietado, pulsaciones de presión, resonancia, etc. Para poder discernir cuál es el problema específico,

es necesario utilizar en forma integrada un conjunto de técnicas de diagnóstico”. [32]

Como ejemplo de lo que es este análisis, se tiene el caso de unos rodamientos cuya pista presenta algunos defectos localizados, por lo cual se producen pulsos de muy corta duración debido al paso de los elementos rodantes (figura 18), los cuales pueden ser detectados y analizados.

**Figura 18.** Ejemplo de aplicación de análisis de vibraciones a un rodamiento defectuoso.



Fuente: Ver referencia [15]

En general, al medir las vibraciones en una máquina, “la frecuencia describirá qué está mal en la máquina y la amplitud cuán severo es el problema”. [35]

Con el propósito de entender exitosamente y/o aplicar esta técnica es necesario tener bases teóricas sólidas en temas como movimiento ondulatorio, vibraciones armónicas, periódicas o aleatorias, ondas en el dominio del tiempo y de la frecuencia, resonancia, entre otros. Sin embargo, no se explicará esta teoría en este libro y se deja como material de investigación para los lectores que así lo

deseen (se puede encontrar gran cantidad de información acerca de estos temas online o en diferentes libros especializados).

### 5.3.1. Monitoreo de vibraciones

Hasta el momento existen dos métodos fundamentales para la medición de vibraciones en máquinas, dependientes de la magnitud que se desee medir y de la forma en que se tome energía del medio objeto de medición.

- Medición acústica.
- Medición de superficie.

Como consecuencia de las fuerzas que se producen entre los elementos de una máquina y de las vibraciones generadas por éstas, la superficie exterior de cada una de las piezas que conforman la máquina, estará variando de forma y de posición. Esto provoca cambios de presión en el aire que en general rodea a los equipos. Esta onda de presión se propaga en el aire afectando a objetos próximos a la fuente de vibración. Uno de estos objetos pudiera ser la membrana del tímpano del oído humano, la que a través del resto del sistema del oído, produce en el cerebro la sensación de sonido. De esta forma, la medición del sonido producido por una máquina da una medida de las vibraciones producidas por ésta. La medición de vibraciones por medio del sonido tiene como ventaja que al mismo tiempo, se miden las vibraciones de todos los puntos de la máquina, pero a la vez tiene una gran desventaja y es que, en la producción industrial muchas veces el sonido circundante es comparable o superior al que proviene de la máquina objeto de análisis.

Por otro lado, es posible cuantificar ya no la propagación de la onda vibro acústica a través del aire, sino la vibración de la superficie de la máquina. Claro está, la medición tendrá que ser realizada en forma discreta o sea, en algunos puntos de la máquina o de la estructura objeto de análisis y en forma directa, porque se mide

a través del contacto entre el dispositivo de medición y la máquina. Sin embargo, algunos instrumentos pueden realizar lo que algunos autores denominan medición indirecta de superficie. Estos instrumentos emplean sensores que no hacen contacto con la superficie donde se desea medir vibraciones, permitiendo cuantificar las mismas desde un punto de vista relativo y/o absoluto.

### 5.3.2. Vibraciones en máquinas rotatorias

El uso de los niveles de vibraciones producidos por las máquinas rotatorias para determinar el estado técnico de éstas, posee muchas aplicaciones en la industria, si se tiene en cuenta que desde hace más de tres décadas ha sido demostrada la veracidad y la utilidad de la información aportada por los registros de vibraciones.

Es imprescindible tener en cuenta que en general, “las fuerzas entre los elementos en contacto en una máquina durante su funcionamiento, determinan la vida útil de los mismos. Sin embargo, lo que se mide no es la magnitud de estas fuerzas, sino las vibraciones en la maquinaria”. [35]

La clave del mantenimiento predictivo (o por condición) radica en vigilar cómo evoluciona cada una de las componentes identificadas a medida que se efectúan mediciones periódicas. Este seguimiento no es nada sencillo, si se tiene en cuenta factores como que para algunas frecuencias, sus correspondientes amplitudes pueden ser aceptables, pero NO para otras frecuencias pertenecientes al mismo espectro, o que más de un problema puede reflejarse a la misma frecuencia.

Normalmente un análisis de vibraciones consta de dos etapas de trabajo, una denominada DETECCIÓN del problema, en la cual es necesario haber definido el llamado ESPECTRO DE REFERENCIA, que obviamente es un espectro correspondiente a las vibraciones registradas en el mismo punto donde

habitualmente se mide en la máquina, pero que fue obtenido cuando se estimó que dicha máquina exhibía una condición mecánica normal. Contra este espectro se compararán las mediciones sucesivas, pudiéndose detectar si alguna de las componentes de frecuencia ha incrementado su amplitud hasta niveles no permisibles, lo cual a su vez indica que se está desarrollando un fallo en la máquina.

La otra etapa contempla la IDENTIFICACIÓN del problema, para la cual se toma como base los resultados anteriores y se inicia una investigación para identificar cuál es el problema y dónde está localizado.

Durante estas etapas se determina el nivel de severidad de la falla, para esto se hace uso de las *tablas de severidad de vibraciones*. La tabla 11 ilustra a manera de ejemplo, una muy conocida que se usa para la evaluación de la severidad de las vibraciones de acuerdo con la velocidad de las mismas (dada en mm/s) y la potencia de las máquinas en las que se presentan.

#### 5.3.2.1. Empleo de las normas de severidad

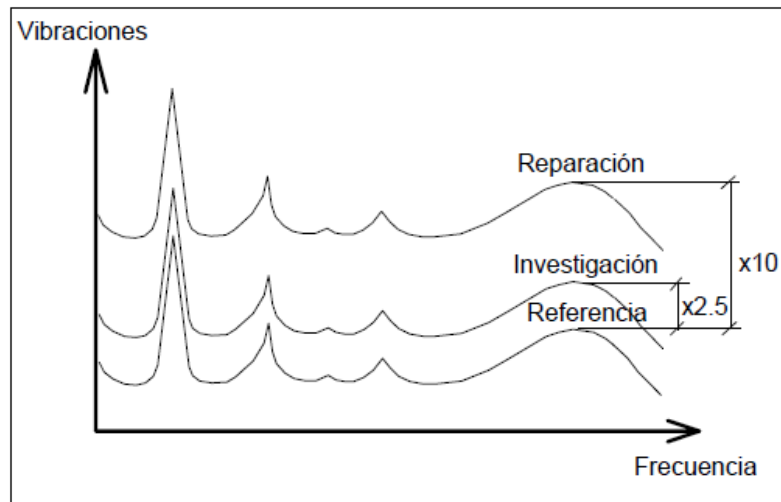
Una buena guía para comenzar un acercamiento a lo que representa una condición normal de una máquina lo constituyen las normas tales como la ISO 10816, o la ISO 2372 la cual especifica diferentes límites en la condición mecánica de las máquinas de acuerdo con la potencia de éstas y el tipo de soporte. De acuerdo a ellas se puede emplear la estrategia mostrada en la figura 19, en la cual se comparan los espectros medidos con respecto al espectro de referencia. Por ejemplo, se aprecia que incrementos de los niveles de vibraciones en 2.5 veces indican un cambio en la condición mecánica de la máquina. Sin embargo, incrementos de 10 veces constituyen un cambio alarmante ya que ésta es la proporción que guarda la condición anormal respecto a la condición normal.

**Tabla 11.** Criterios de severidad de las vibraciones acorde con las normas ISO 2372 - ISO 10816.

45.00	No Permisible	No Permisible	No Permisible	No Permisible
28.00				Límite
18.00				Límite
11.20				
7.10				Límite
4.50				
2.80	Límite	Admisible	Admisible	Admisible
1.80				
1.12	Admisible	Admisible	Normal	Normal
0.71				
0.45	Normal	Normal	Normal	Normal
0.28				
0.18				
- Vel. [mm/s]	Máquinas Pequeñas (<15 kW)	Máquinas Medianas (15-75 kW) (300 kW, soporte especial)	Máquinas grandes (base rígida) (>75 kW)	Máquinas grandes (alta velocidad) (>75 kW)

Fuente: Ver referencia [35]

**Figura 19.** Cambios relativos al espectro de referencia.



Fuente: Ver referencia [35]

### 5.3.3. Vibraciones en motores de inducción

Algunos de los problemas electromecánicos más comunes en los motores de inducción, que pueden ser identificados midiendo y analizando correctamente las vibraciones son: corrimiento del centro magnético, barras del rotor agrietadas o rotas, corto circuito en el bobinado del estator, deformaciones térmicas, desbalance y falla de rodamientos.

#### 5.3.3.1. Corrimiento del centro magnético

Esta situación se presenta cuando el rotor no está correctamente ubicado con respecto al centro magnético del estator, ya sea en la dirección axial o en la dirección lateral. Este problema se identifica cuando “en los espectros de las vibraciones se observen componentes a la frecuencia de línea o sea, 60 Hz y a la frecuencia de operación del motor. Esta última aparecerá acompañada de bandas laterales a la frecuencia de deslizamiento por el número de polos del motor”. [35]

#### 5.3.3.2. Rotura de barras en el rotor

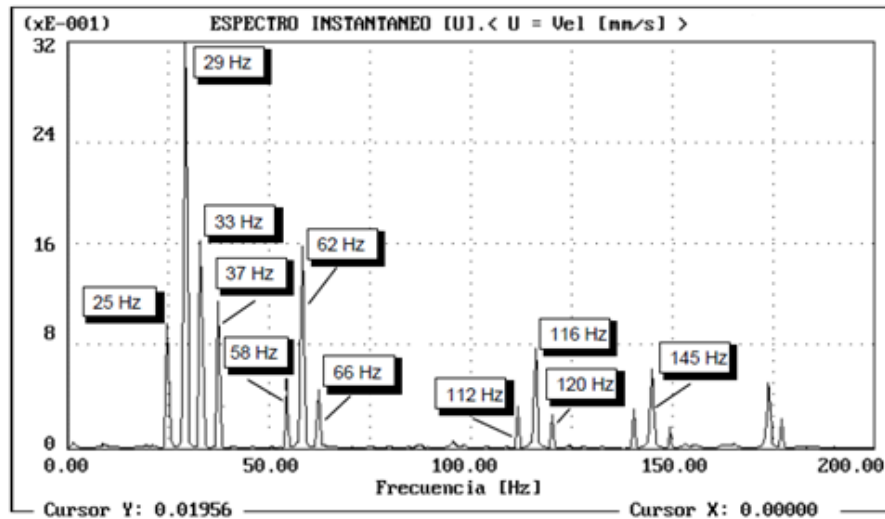
Debido a este fallo mecánico se produce un desbalance eléctrico en el motor, que a la vez genera niveles de vibraciones considerablemente altos en el primer y segundo armónico de la velocidad de rotación.

#### 5.3.3.3. Corto circuito en el bobinado del estator

Es una falla que produce un aumento en la vibración de la máquina, y por ende degradación del aislamiento y daños a los rodamientos del motor. Se puede detectar cuando en el espectro se observan bandas laterales a la frecuencia de deslizamiento por el número de polos del motor.

En la figura 20 se muestra el espectro de vibraciones registrado en un motor con este problema operando a 1740 r.p.m. (29 Hz), con una frecuencia de deslizamiento de 1 Hz y 4 polos.

**Figura 20.** Espectro de las vibraciones en un motor de 1740 RPM con cortocircuito en algunas espiras de sus polos.



Fuente: Ver referencia [35]

#### 5.3.3.4. Deformaciones debidas a causas térmicas

“El rotor también es susceptible de sufrir deformaciones debido a la concentración de altas temperaturas en él, cuyo origen radica en el aislamiento deficiente de varias láminas contiguas en zonas del propio rotor pudiendo provocar roces eventuales de éste con el estator. Este problema trae consigo un efecto de "retroalimentación" ya que a pesar de que al inicio las deformaciones en el rotor son muy pequeñas, éstas hacen que se generen fuerzas electromagnéticas desbalanceadas lo cual a la vez genera mayor incremento en la temperatura haciendo más severas las deformaciones en el mismo.

Este problema se puede identificar a través de los incrementos sistemáticos en los niveles de vibraciones a la frecuencia de rotación, los cuales se incrementan con el incremento de la temperatura”. [35]

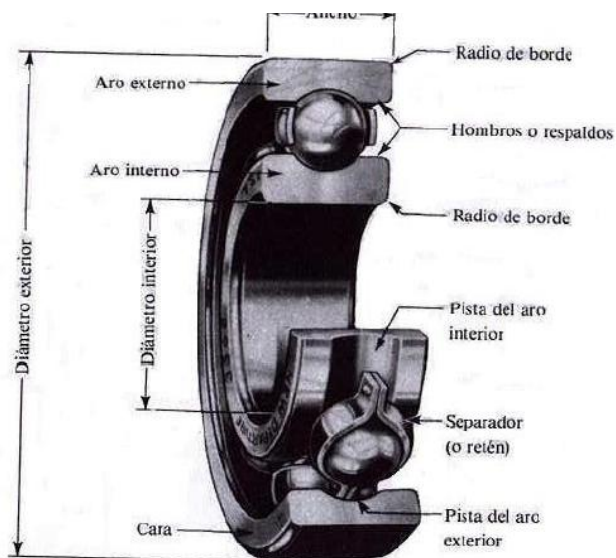
#### 5.3.3.5. Desbalance

El desequilibrio másico o desbalance ocurre cuando el centro de masa de la pieza rotativa no coincide con el eje de rotación. El desequilibrio másico causa una fuerza rotativa que genera una vibración a la frecuencia de rotación del eje.

Las principales características de la vibración causada por desbalance son: vibración armónica con frecuencia de  $1x$  RPM, la amplitud de la vibración es proporcional a la cantidad de desbalance y a la velocidad de rotación, la vibración presenta muy bajos o ningunos armónicos. [10]

#### 5.3.3.6. Fallas en rodamientos

**Figura 21.** Despiece de un rodamiento de bolas.



Fuente: Ver referencia [10]

Hay un gran número de mecanismos que pueden conducir a la falla del rodamiento, como lo son: daño mecánico, daño por grieta, daño por desgaste, deficiencia del lubricante y corrosión.

El punto de partida para el monitoreo de fallas en este tipo de elementos es que “los rodamientos defectuosos generan frecuencias de vibración a las velocidades de falla de cada componente y cada una de esas frecuencias puede ser calculada y registrada. Esto quiere decir que dependiendo de la ubicación del defecto en el rodamiento, se generan vibraciones de diferente frecuencia”. [10]

Normalmente los rodamientos presentan distintas etapas de deterioro desde el inicio incipiente hasta la falla total. Para cada una de estas etapas existe información acerca de la forma característica del espectro de vibración que permiten realizar un diagnóstico adecuado.

El uso del análisis espectral de las vibraciones, para predecir la presencia de defectos en los rodamientos de las máquinas es una tarea difícil, sobre todo cuando dicha falla se encuentra en una etapa inicial, o cuando las máquinas giran a bajas velocidades. Es por esto que en ocasiones se recomienda apoyarse en otras técnicas como el análisis de forma de onda y técnicas de procesamiento de señales de alta frecuencia como el ultrasonido.

Los principales problemas que se pueden detectar en los rodamientos son: fallas en la pista interna, en la pista externa o en los elementos rodantes (como agrietamiento o desastillamiento del material) y deterioro o deformación de la jaula, caja o cubierta que mantiene en su posición a los elementos rodantes.

#### **5.4. MCSA (MOTOR CURRENT SIGNATURE ANALYSIS)**

La técnica denominada Motor Current Signature Analysis (MCSA) se centra en el análisis espectral de las corrientes de estator. Mediante este análisis se pueden diagnosticar averías mecánicas y eléctricas en los motores de inducción.

MCSA constituye uno de los métodos más poderosos para la detección de fallas de motores eléctricos en tiempo real. Este análisis se puede realizar mediante diversas formas debido a que existen varias transformadas que permiten observar la señal en diferentes dominios, como el dominio del tiempo, el dominio de la frecuencia, o ambos. “La observación de determinadas características de la señal y su espectro permite establecer indicadores de falla, cuya evaluación permite determinar si una cierta falla existe o no”. [34]

Con el propósito de entender exitosamente y/o aplicar esta técnica es necesario tener bases teóricas sólidas en el análisis de ondas en el dominio del tiempo y de la frecuencia. Sin embargo, no se explicará esta teoría en este libro y se deja como material de investigación para los lectores que así lo deseen (se puede encontrar gran cantidad de información acerca de este tema online o en diferentes libros especializados).

##### **5.4.1. Análisis espectral de la corriente en motores de inducción**

El MCSA permite evaluar la condición eléctrica y mecánica de los motores. A través del análisis de la corriente del motor se pueden detectar variaciones en la carga o en el propio motor, cada una de estas variaciones tiene una frecuencia característica propia que queda marcada en la corriente de alimentación del motor. Para dar un diagnóstico exacto, el MCSA utiliza la transformada rápida de Fourier (FFT).

Una de las reglas principales del sistema MCSA, es que si los picos que se muestran en la señal de corriente, también se muestran en la señal de voltaje, la falla es de naturaleza eléctrica y si por el contrario, los picos que se muestran en la señal de corriente, no se muestran en la señal de voltaje, la falla es de naturaleza mecánica.

“La metodología de detección de las fallas más comunes en motores de inducción empleando MCSA consiste en que, conocidas las ecuaciones de frecuencia de fallo para cada una de dichas fallas, se toman las muestras de la señal de corriente del estator y a través de la manipulación de dichas muestras con alguna transformación se indica si la frecuencia excitada por la falla en la señal de corriente existe o no”. [34]

Las fallas detectables a través de MCSA son: fallas en rodamientos, cortos circuitos de las bobinas del estator, rotura de anillos del rotor y excentricidad del rotor, pero se aplica fundamentalmente a la detección de la rotura de barras de la jaula del rotor (se han realizado estudios que demuestran que este método es más efectivo para esto que el análisis de vibraciones).

#### 5.4.1.1. Barras Rotas

Es conocido que la presencia de barras rotas en el rotor de un motor de inducción trifásico provoca la aparición de armónicos adicionales en las corrientes de fase del estator.

La expresión que indica las componentes de falla está dada por la ecuación:

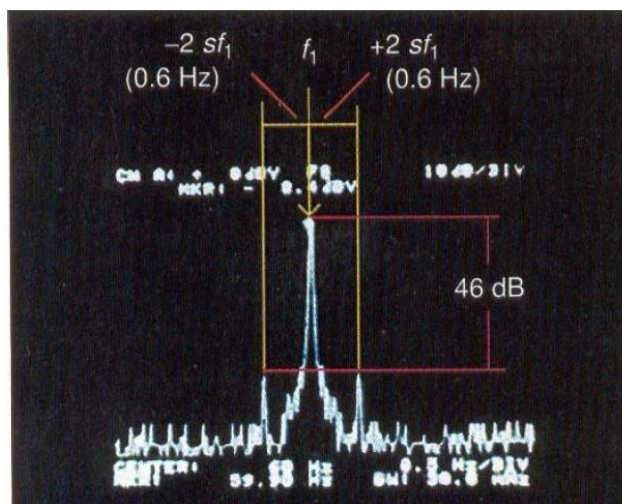
$$f_b = (1 \pm 2ks)f_0$$

Con k: 1, 2, 3,...,  $f_0$  es la frecuencia de suministro de la red y S es el deslizamiento.

Esta expresión sugiere la aparición de componentes laterales alrededor de la frecuencia fundamental (en nuestro caso esta frecuencia es la de la línea de alimentación del motor - 60 Hz), en presencia de la falla. [34]

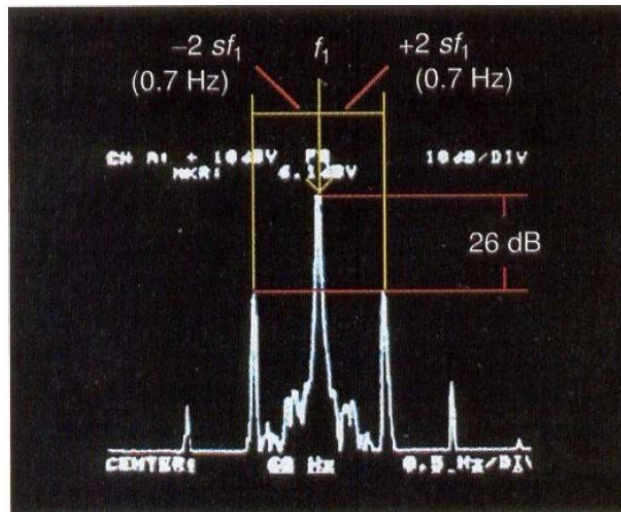
Sin embargo, aunque el motor esté en perfecto estado, estos armónicos están siempre presentes en la corriente de la máquina, debido a las asimetrías del rotor inherentes al proceso de fabricación y ensamblado. Por lo tanto el método consiste más que en detectar la presencia de los armónicos, en monitorizar su amplitud y comparar que no exceda de un cierto umbral en referencia a la componente de la frecuencia de alimentación. El umbral que marca la frontera entre un motor sano y un motor con barras rotas se suele fijar alrededor de los 40 dB's. En las figuras 22 y 23 se puede observar el espectro de frecuencia de las corrientes de una fase del estator de un motor considerado sano (figura 22) y del mismo motor con un número considerable de barras rotas (figura 23).

**Figura 22.** Espectro de la corriente de un motor en buen estado.



Fuente: Ver referencia [24]

**Figura 23.** Espectro de la corriente de un motor averiado.



Fuente: Ver referencia [24]

#### 5.4.1.2. Corto Circuito en el estator

La ecuación a continuación corresponde a las frecuencias asociadas a la falla de corto circuito entre vueltas de un devanado:

$$f_{st} = f_1 \left\{ \frac{n}{p} (1 - s) \pm k \right\}$$

Donde  $f_{st}$  es la frecuencia de las componentes de frecuencia asociadas a la falla de corto circuito,  $f_1$  es la frecuencia de la red de suministro del sistema eléctrico,  $p$  es el número de pares de polos,  $n=1, 2, 3, \dots$ ,  $k=1, 3, 5, \dots$ , y  $S$  es el deslizamiento del motor. [34]

Este tipo de falla es acumulativa (puede comenzar como una simple falla de aislamiento entre dos vueltas del devanado), y las altas corrientes que se

producen durante el arranque del motor pueden destruir los devanados de fase o causar cortos entre fases o entre una fase y tierra.

Pasos básicos para el análisis espectral de la corriente (MCSA)

Los pasos para el análisis MCSA son los siguientes:

- Realizar una apreciación global del sistema a ser analizado.
- Toma de datos: tomar la señal de corriente durante 10 segundos, para analizar la máquina durante ese periodo de tiempo.
- Revisión y análisis de datos: Que consta de una revisión a baja frecuencia de la demodulación de la corriente, para ver la condición del rotor e identificar problemas relacionados con la carga y de una revisión a alta frecuencia de la demodulación de la corriente y voltaje para determinar fallas eléctricas o mecánicas. [3]

## CONCLUSIONES

Por medio de los conceptos tratados acerca de la metodología AMFE, los elementos que pueden fallar en un motor eléctrico, como pueden hacerlo y las principales tareas de mantenimiento que se aplican a los motores eléctricos hoy en día (incluyendo las diferentes técnicas de mantenimiento predictivo o basado en la condición), se enunciaron criterios necesarios para definir un plan de mantenimiento para un motor eléctrico de inducción, sin importar el campo específico en que se esté desempeñando.

El mantenimiento en sus distintas formas es fundamental en todos los sectores en que se utilicen equipos mecánicos y/o electrónicos. Tiene un gran impacto en diversos ítems como la confiabilidad y disponibilidad de los procesos, la calidad de los productos, los costos de producción, el cuidado del medio ambiente, de la vida humana y hasta de la moral de los trabajadores, entre otros.

En muchas ocasiones se suministran grandes cantidades de recursos y esfuerzos a la aplicación de tareas y técnicas de mantenimiento que no son correctamente seleccionadas y que por ende, no van a asegurar que se obtengan los resultados esperados.

El análisis modal de fallos y efectos es una metodología estructurada que permite definir el conjunto de tareas de mantenimiento más apropiadas para un equipo o proceso (no importa de qué tipo), según su contexto operacional, modos, causas y efectos de falla. Asegurando que se va a proteger la vida útil de los activos y por ende, que se van a obtener todos los beneficios de un mantenimiento bien definido y aplicado.

Las técnicas de mantenimiento predictivo que se han desarrollado en los últimos años son herramientas que permiten detectar la aparición de las fallas antes de que estas tengan consecuencias graves; sin embargo, se debe contar con bases

teóricas sólidas y experiencia para poder aplicarlas y brindar resultados confiables que den valor agregado al mantenimiento de los equipos. Además, siempre que sea posible se deben utilizar técnicas complementarias y no concentrarse en la aplicación de una sola, esto ayudará a obtener mejores resultados y a corroborar los diagnósticos.

Se estudiaron todos los elementos de los motores eléctricos de inducción (las barras, los devanados, los rodamientos, las escobillas, entre otros) y las diferentes maneras en que estos pueden fallar (rotura de barras, cortocircuitos en los devanados, daño del aislamiento, daños en rodamientos, entre otros).

Se estudiaron las diferentes tareas que normalmente hacen parte de los planes de mantenimiento preventivo y predictivo de las industrias actuales.

Este trabajo presenta un compendio de técnicas y criterios que son de gran importancia para complementar el conocimiento que actualmente se obtiene en los cursos referentes a los motores eléctricos trifásicos de inducción.

La culminación de este trabajo muestra al ingeniero electrónico de la Universidad Industrial de Santander como un profesional capaz de aplicar sus conocimientos y de adquirir nuevos según las necesidades que se tengan, que puede desempeñarse exitosamente en diversas áreas del sector productivo de la sociedad y que puede aportar al mejoramiento continuo de la misma.

## REFERENCIAS

- [1] AETIR (asociación española de termografía infrarroja). PDF M.36.312 – 2011. Guía de la termografía infrarroja. Aplicaciones en ahorro y eficiencia energética. España. 2011.
- [2] A-MAQ S.A. Análisis de maquinaria. Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico. 2005.
- [3] Análisis espectral de la corriente de consumo. Artículo de Internet: ([dSPACE.upse.edu.ec/bitstream/123456789/73/13/Capitulo5.pdf](http://dSPACE.upse.edu.ec/bitstream/123456789/73/13/Capitulo5.pdf)).
- [4] Análisis modal de fallos y efectos (A. M. F. E.). Artículo de Internet: (<http://www.fundibeq.org>).
- [5] Artículo sobre el mantenimiento preventivo. Internet: ([http://www.cridlac.org/pdf/toolkit/modulo4/mantenimiento\\_preventivo.pdf](http://www.cridlac.org/pdf/toolkit/modulo4/mantenimiento_preventivo.pdf))
- [6] BECERRA SOLÓRZANO Guillermo. Diseño de un Sistema Integrado de Confiabilidad Operacional para el Área de Servicios Industriales de Bavaria S.A. Cervecería de Boyacá. Tesis Universidad pedagógica y tecnológica de Colombia. Escuela de Ingeniería Electromecánica. Duitama 2005.
- [7] BESTRATÉN BELLOVÍ Manuel, ORRIOLS RAMOS Rosa M<sup>a</sup>. Nota Técnica de prevención: Análisis modal de fallos y efectos, AMFE. Instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo, España. 2005.
- [8] BHAG S. Guru y HUSEYIN R. Hiziroglu. Máquinas eléctricas y transformadores. Libro tercera Edición. Oxford University Press.

- [9] CAJAS MALDONADO Carlos Alberto, JANETA MELO Alberto Darwin. Tesis: Planificación de mantenimiento basado en el método de confiabilidad RCM para motores estacionarios de la planta Termopichincha s.a. Central Guangopolo. Escuela politécnica nacional. Facultad de ingeniería mecánica. Quito, Julio de 2009.
- [10] CARVAJAL SUÁREZ Helmer Omar, ESTUPIÑÁN LÓPEZ Iván Fernando. Detección de fallas en un motor de inducción usando análisis de vibraciones mecánicas bajo distintos escenarios de carga. Universidad Industrial de Santander. 2010.
- [11] CASTELLANOS Arturo. Mantenimiento Correctivo. Artículo de Internet: (<http://worker110989.blogspot.com/>). Abril de 2012.
- [12] ENSMINGER Dale, Ultrasonics: Fundamentals, technologies and Applications. Third Edition. CRC Press, Taylor & Francis group LLC. New York. 1988.
- [13] ESCALONA Iván. Pruebas no destructivas – ultrasonido. Artículo de Internet: (<http://www.monografias.com/trabajos14/ultrasonido/ultrasonido.shtml>).
- [14] ESPINOSA FUENTES Fernando. Presentación: Ultrasonido, una técnica predictiva muy versátil en el mantenimiento. Universidad de Talca, Chile.
- [15] ESTUPIÑÁN Edgar, SAAVEDRA Pedro. Artículo: Técnicas de diagnóstico para el análisis de vibraciones de rodamientos. Universidad de Concepción – Chile.
- [16] FLIR SYSTEMS AB. Guía de termografía para mantenimiento predictivo. 2011.

- [17] FLUKE Ibérica, S.L. PDF, Pub\_ID: 10999-spa. Guía de aplicaciones de la termografía en mantenimiento industrial. Madrid, España. 2005.
- [18] FRANCO Irene. Universidad gran mariscal de Ayacucho. Mantenimiento Predictivo. Artículo de Internet:  
(<http://www.monografias.com/trabajos17/mantenimiento-predictivo/mantenimiento-predictivo.shtml>)
- [19] GARCÍA PALENCIA Oliverio. Estrategias de Mantenimiento Basadas en Confiabilidad. Primer Congreso Internacional de Ingeniería Electromecánica. Villa del Rosario de Cúcuta 2004.
- [20] GARZÓN ROJAS Ricardo Edwin. Tesis: Sistema automatizado de mantenimiento centrado en confiabilidad para pequeñas y medianas empresas. Escuela politécnica nacional. Quito, septiembre 2007.
- [21] GUINUDINIK José Luis. Motores asincrónicos: principios de funcionamiento, características, clasificación, funcionamiento con velocidad variable. Tesis, Universidad tecnológica Nacional – facultad regional Tucumán, Argentina.
- [22] HIDALGO B. Juan C. Artículo de Análisis de las zonas de falla de los Motores Eléctricos. Grupo Termogram, San José, Costa Rica. 2007.
- [23] HIDALGO B. Juan C. La importancia de la correlación de las tecnologías predictivas en el diagnóstico de motores eléctricos. 1er congreso mexicano de confiabilidad y mantenimiento, Octubre 30-31, 2003 – León, México.
- [24] IEEE INDUSTRY APPLICATIONS MAGAZINE. Artículo Current signature analysis to detect induction motor faults. Edición Julio/Agosto de 2001.

[25] INSTITUTO TÉCNICO DE CAPACITACIÓN Y PRODUCTIVIDAD. Manual de Instalación y mantenimiento de motores eléctricos trifásicos. Documento MT.3.4.2-45/04. Guatemala. Agosto de 2002.

[26] LAND INSTRUMENTS INTERNATIONAL – PDF training thermography V1/1104. Guía básica a la termografía. Dronfield, Inglaterra. 2004.

[27] LIBRERÍA HORDAGO. AMFE: Análisis Modal de Fallos y Efectos. Departamento de Promoción Económica. Artículo de Internet: (blog.pucp.edu.pe/media/avatar/665.pdf).

[28] Mantenimiento Industrial. Artículo de Internet: (<http://www.monografias.com/trabajos15/mantenimiento-industrial/mantenimiento-industrial.shtml>)

[29] Mantenimiento para motores asíncronos de anillos rozantes. 2010. Internet: (<http://es.scribd.com/doc/47317870/MANTENIMIENTO-PARA-MOTORES-ASINCRONOS-TRIFASICOS-DE-ANILLOS-ROZANTES>)

[30] MONTAÑA RIVEROS Leonardo, ROSAS NIÑO Elkin Gustavo. Tesis: Diseño de un sistema de mantenimiento con base en análisis de criticidad y análisis de modos y efectos de falla en la planta de coque de fabricación primaria en la empresa Acerías paz del río s.a. Duitama – 2006.

[31] MOUBRAY Jhon. Libro: Mantenimiento centrado en la confiabilidad. Editorial Aladon ltd. Edición en español, 2004.

[32] ORDOÑEZ GUERRERO Antonio. Trabajo de fin de curso: Alcances de la implementación de nuevas técnicas de análisis en los programas de

mantenimiento predictivo – proactivo en la industria. Universidad de Sevilla. Febrero de 2008.

[33] ORTEGA VALENZUELA Mario Andrés. Tesis: Análisis técnico y de costos para implementar un plan de mantenimiento predictivo mediante termografía en cementos Bío Bío. Universidad de Talca. Facultad de ingeniería de ejecución en mecánica. Curicó – Chile. 2006.

[34] OVIEDO CASTILLO Silvia Juliana. Trabajo de investigación: Detección de fallas en motores de inducción usando MCSA (motor current signature analysis) y máquinas de soporte vectorial. Universidad Industrial de Santander. 2011.

[35] PALOMINO MARÍN Evelio. Curso de análisis de vibración. La medición y el análisis de vibración en el diagnóstico de máquinas rotativas. Centro de Estudios de Innovación y Mantenimiento, Reparto Siboney, Playa Cuba (1997).

[36] PIEDRA PALADINES María Fernanda. Tesis: Gerencia estratégica de mantenimiento de la empresa plásticos del litoral – Plastlit. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil, Ecuador. 2005.

[37] Principios del ultrasonido y sus aplicaciones. Artículo de Internet: ([www.desi.iteso.mx/elec/instru/ultrason.pdf](http://www.desi.iteso.mx/elec/instru/ultrason.pdf)).

[38] REYNA Alberto F. Libro: Termografía nivel 1. Ademinsa, Colombia S.A.S.

[39] ROMANO TOMASINO Cesar. Presentación: Estudios de tecnología Infrarroja. Aplicaciones prácticas para la industria. Empresa T.A Consult S.A.

[40] SEMAPI S.A. Ventajas de la inspección termográfica. Artículo de Internet:

([http://www.semapi.com/es/descargas\\_servicios/download.php?f=Presentacion%20Termografia.ppt](http://www.semapi.com/es/descargas_servicios/download.php?f=Presentacion%20Termografia.ppt)).

[41] SUAREZ Raphael. Cálculo de la frecuencia de inspección de mantenimiento predictivo. Caracas, Venezuela - Junio 2007. Artículo de internet: ([www.mantenimientomundial.com/sites/mm/notas/Frec\\_pred.pdf](http://www.mantenimientomundial.com/sites/mm/notas/Frec_pred.pdf))

[42] WEG industrias S.A – PDF referencia 1018.08/1101. Manual de instalación y mantenimiento de motores eléctricos de inducción trifásicos (Baja y alta tensión). Sao Paulo.

[43] WEG industrias S.A – PDF referencia 11171351, Motores eléctricos de inducción trifásicos de alta y baja tensión. Línea M - Rotor de jaula – Horizontales. Manual de Instalación, Operación y Mantenimiento. Revisión 2. 2011.

# ANEXO A

## TIPOS DE MANTENIMIENTO

## **1. Mantenimiento Preventivo**

Este tipo de mantenimiento surge de la necesidad de disminuir la aparición de fallas catastróficas repentinas y todo lo que representan. Pretende inspeccionar los equipos de tal manera que permite anticiparse a la aparición de fallas y al mismo tiempo reducir el número de reparaciones mediante la aplicación de una rutina de inspecciones periódicas y la renovación de los elementos desgastados (se compone de tareas que se repiten en el tiempo).

Básicamente consiste en programar revisiones de los equipos, apoyándose en el conocimiento de las máquinas en base a la experiencia, los manuales e instructivos y los históricos obtenidos de las mismas. Al hacer esto se determina un plan de mantenimiento para cada máquina, donde se realizarán las acciones necesarias (lubricar, cambiar, desmontar, limpiar, etc.) para mantener las instalaciones y los activos productivos en óptimas condiciones de operación que aseguren una buena eficiencia, confiabilidad y disponibilidad de los mismos.

Un buen mantenimiento preventivo permite obtener experiencia en la determinación de las causas de las fallas repetitivas, del tiempo de operación seguro de los equipos y en la definición de los puntos débiles de las instalaciones, máquinas, etc. Y la gran ventaja que presenta es que al estar todas las actividades de mantenimiento adecuadamente programadas las paradas se realizarán con todas las facilidades y causando mínimos inconvenientes a la producción.

“Entre los beneficios del mantenimiento preventivo se pueden mencionar:

1. - Reduce las fallas y tiempos muertos (incrementa la disponibilidad de equipos e instalaciones).
2. - Incrementa la vida útil de los equipos e instalaciones.

3. - Mejora la utilización de los recursos.
4. - Reduce los niveles del inventario.
5. – Ahorro”. [15]

A continuación se muestran los niveles o etapas básicas en los que se podría definir el mantenimiento preventivo. La primera etapa llamada mantenimiento autónomo debería ser responsabilidad de los propios operadores de proceso ya que consta de tareas sencillas de inspección, lubricación y control visual de los activos que están directamente relacionadas con el funcionamiento diario de los mismos. En la segunda etapa se realizan inspecciones y revisiones de un mayor nivel (mediciones de corriente, voltaje, resistencia, elongación, etc.), por lo cual deben ser realizadas por el personal de mantenimiento especializado y en la tercera etapa se realizan las tareas de sustitución de piezas, reacondicionamiento cíclico (volver a colocar un activo en su estado ideal de funcionamiento) y modificaciones de los activos.

**Figura 24.** Mantenimiento programado – preventivo.



Fuente: Ver referencia [22]

## 2. Mantenimiento Correctivo

También conocido como mantenimiento reactivo, es aquel que se ocupa de la reparación o recambio una vez se ha producido una falla funcional súbita de alguna máquina o instalación. Es decir que ocurre de manera aleatoria y básicamente consiste en desmontar, reparar, reemplazar o restaurar el componente averiado y volver a montarlo nuevamente para entregarlo al proceso productivo.

Como sus principales desventajas se pueden mencionar las siguientes:

- Las fallas pueden aparecer en los momentos más inoportunos, lo cual puede generar consecuencias indeseadas como grandes pérdidas económicas, accidentes, inconformidad del personal, entre otras (se puede decir que es el más costoso de todos los tipos de mantenimiento).
- Las fallas no detectadas a tiempo pueden causar daños irreparables en otras maquinas o elementos.
- Se debe contar con grandes cantidades de inventario para poder solucionar cualquier falla que se presente en cualquier momento.

Dentro de este tipo de mantenimiento podríamos contemplar dos tipos de enfoques: *No planificado* y *Planificado*.

“El proceso de mantenimiento correctivo se inicia con el fracaso y con un diagnóstico que busca determinar por qué el fracaso apareció. El proceso de diagnóstico puede incluir la inspección física de un sistema, el uso de un equipo para evaluar el sistema, las entrevistas con los usuarios del sistema, y otra serie de medidas. Es importante determinar qué causó el problema, a fin de tomar las medidas adecuadas, y ser conscientes de que múltiples fallas de componentes o

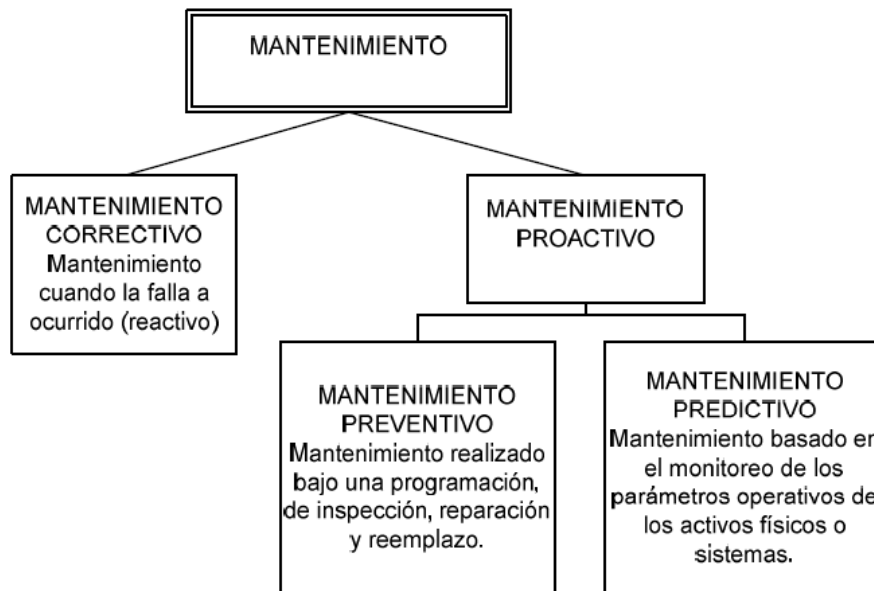
de software pueden haber ocurrido de forma simultánea, con el fin de evitar que esta situación se vuelva a presentar.

El siguiente paso es la sustitución o restauración de los componentes dañados o del software defectuoso. En algunos casos, el daño puede ser irreparable, haciendo que la sustitución completa sea necesaria para recuperar la funcionalidad del sistema”. [14]

En algunos casos, puede ser imposible predecir o prevenir una falla funcional, lo que hace del mantenimiento correctivo la única opción. En otros casos, la gente puede optar por centrarse en realizar labores correctivas, en lugar de preventivas, como parte de una estrategia de mantenimiento.

Las diferencias entre el mantenimiento correctivo y preventivo se exponen a continuación en la figura 25.

**Figura 25.** Naturaleza de los tipos de mantenimiento.



Fuente: Ver referencia [22]

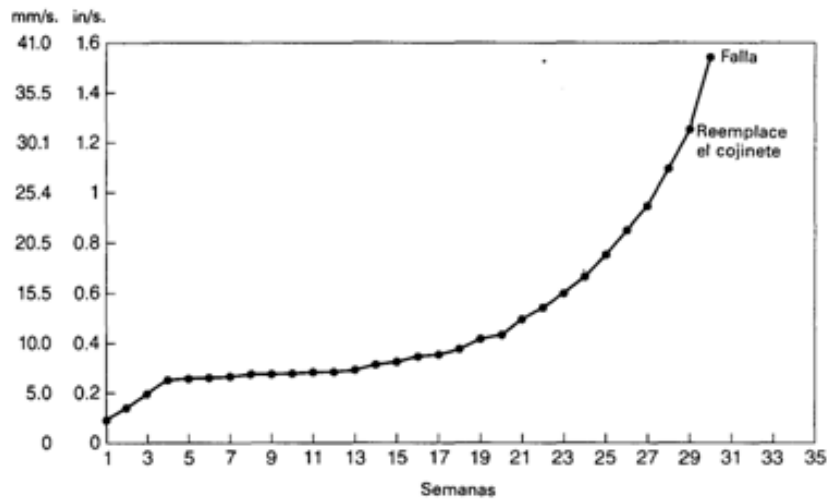
### **3. Mantenimiento Predictivo, basado en la condición o CBM**

También conocido como mantenimiento basado en la condición (CBM), este tipo de mantenimiento se basa en predecir la falla antes de que esta se produzca. Se trata de conseguir adelantarse a la falla o al momento en que el equipo o elemento deja de trabajar en sus condiciones óptimas, realizando una intervención en el momento más apropiado. Para conseguir esto se utilizan herramientas y técnicas no invasivas de monitoreo de parámetros físicos que muestran una relación predecible con el ciclo de vida del componente. Algunos ejemplos de dichos parámetros podrían ser:

- “Vibración de cojinetes.
- Temperatura de las conexiones eléctricas.
- Resistencia del aislamiento de la bobina de un motor.

El uso del mantenimiento predictivo consiste en establecer, en primer lugar, una perspectiva histórica de la relación entre la variable seleccionada y la vida del componente. La figura 26 muestra como el CBM puede determinar cuándo se debe cambiar un juego de cojinetes. Una curva típica que resulta de graficar la variable (vibración) contra el tiempo sugiere que deberán reemplazarse los cojinetes subsecuentes cuando la vibración alcance 1,25 in/seg (31,75 mm/seg)”.  
[18]

**Figura 26.** Ejemplo de aplicación de Análisis de vibraciones.



Fuente: Ver referencia [18]

Su aplicación conlleva altos costos iniciales, en la adquisición y/o instalación de los dispositivos de monitoreo, en la implantación del sistema de administración y análisis de datos y en el adiestramiento del personal, sin embargo estos costos se irán reduciendo paulatinamente y serán altamente rentables cuando el sistema esté funcionando en su totalidad.

Una de las grandes ventajas de este tipo de mantenimiento es la generación de un archivo histórico acerca del funcionamiento, modos de falla, comportamiento mecánico, entre otros de cada uno de los activos físicos o sistemas que puede ayudar en la toma de decisiones en cuanto a la seguridad industrial, la adquisición de nuevas maquinarias u otras decisiones técnicas y económicas de cada industria.

Más adelante se dará una descripción detallada de cada una de las principales técnicas de mantenimiento predictivo que se aplican a los equipos que realizan los diferentes procesos de la industria actual.

## ANEXO B

### ERROR HUMANO

Durante la descripción del AMFE se mencionaba que muchas fallas en los equipos son causadas por “errores humanos”, y que si un error humano específico es considerado una razón creíble para que ocurra una falla funcional, entonces ese error debe ser incluido en el AMFE. Sin embargo los errores humanos representan un tema de enorme importancia y por eso merecen ser considerados aparte. El propósito de este anexo es proveer un resumen corto de las categorías principales de error humano, y sugerir como se los debe tratar dentro del marco del AMFE.

### **Categorías principales de errores humanos**

Cuando se considera la interacción de personas y máquinas, Blanchard (1995), agrupaba los principales factores bajo 4 títulos:

- Factores antropométricos.
- Factores sensoriales humanos.
- Factores Psicológicos.
- Factores Fisiológicos.

Prácticamente todo error humano que lleva a una falla o problema, se debe a por lo menos una de estas cuatro áreas. Como resultado, las revisamos en este apéndice.

#### **Factores Antropométricos**

Los factores antropométricos son los relacionados al tamaño o fuerza de los operadores o mantenedores. Los errores ocurren porque una persona (o parte de una persona, tal como una mano o brazo): Simplemente no entra en el espacio disponible para llevar a cabo una tarea, no puede alcanzar algo, no tiene la suficiente fuerza para levantar o mover algo.

## Factores Sensoriales Humanos

Los factores sensoriales humanos hacen referencia a la facilidad de las personas para ver, oír, sentir, y hasta oler lo que sucede alrededor. En el caso de los operadores esto tiene a aplicarse a la visibilidad y legibilidad de instrumentos en consolas de control. Para el personal de mantenimiento, se refiere a la visibilidad de los componentes en recovecos y ranuras de sistemas complejos. Los niveles y variabilidad de ruido también afectan la capacidad de operadores y mantenedores de discernir qué está pasando con sus equipos.

## Factores Fisiológicos

El término “factores Fisiológicos” se refiere a presiones medio ambientales que afectan el desempeño humano. Estas presiones incluyen temperaturas altas o bajas, ruidos fuertes o molestos, humedad excesiva, altas vibraciones, exposición a químicos tóxicos o radiación, o simplemente el trabajar por demasiadas horas (especialmente en una tarea con exigencias físicas o mentales) sin los descansos adecuados.

La exposición continua a estas presiones lleva a una capacidad sensorial reducida, respuesta motriz más lenta y a una lucidez mental reducida. Estas son todas manifestación de fatiga humana, y todas aumentan las posibilidades de que las personas cometan errores, deslices o tengan lapsos.

## Factores Psicológicos

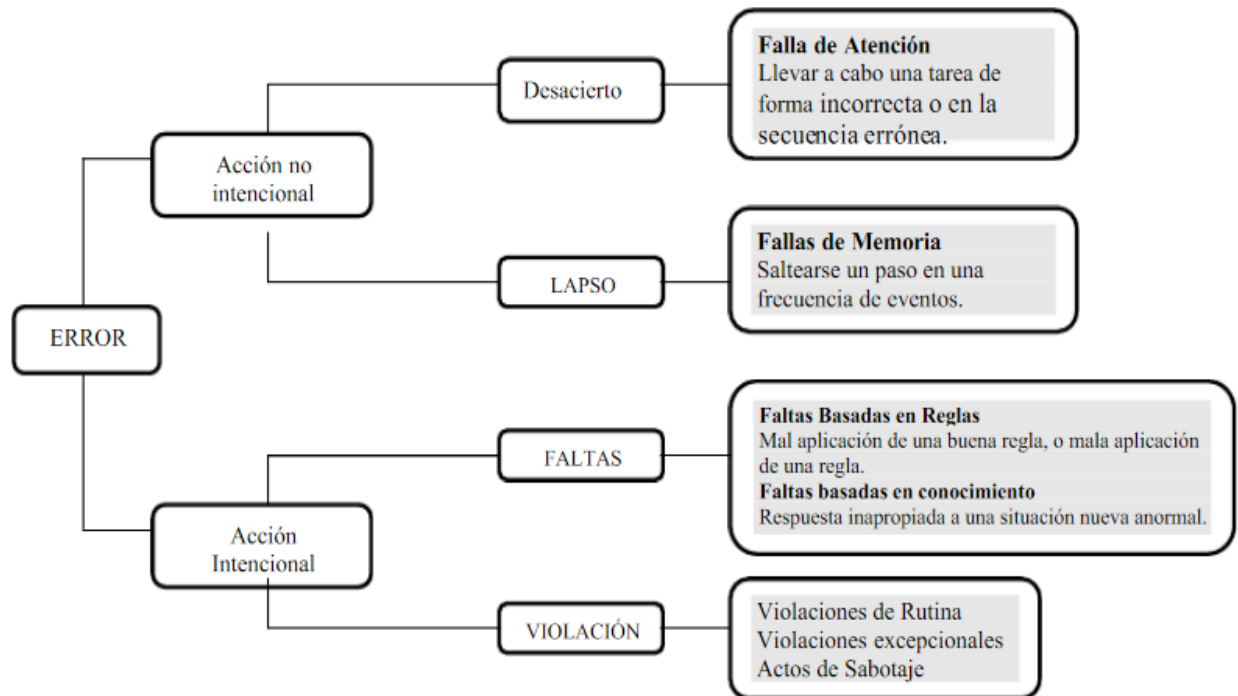
Hay tres series de factores discutidos hasta ahora, y todos se refieren a factores externos que causan el error humano. Como resultado son muy fáciles de identificar y de manejar (aunque hacerlo puede llegar a ser costoso). Una

categoría mucho más compleja y desafiante de errores son aquellas que tienen sus raíces en la psiquis de los seres humanos.

### Errores psicológicos

Generalmente se divide las categorías psicológicas de errores humanos entre los que son no intencionales, y los intencionales. Un error no intencional es uno que ocurre cuando alguien realiza una tarea que se supone lleve a cabo, pero la hace en forma incorrecta (“hace el trabajo en forma incorrecta”). Un error intencional ocurre cuando alguien deliberadamente establece hacer un trabajo, pero lo que hace es inapropiado (hace el trabajo equivocado). Se divide estas categorías en mayor detalle del siguiente modo:

**Figura 27.** Categorías de errores psicológicos.



Anexo tomado de referencia [31]

## ANEXO C

# TABLAS PARA LUBRICACIÓN DE MOTORES ELÉCTRICOS

**Tabla 12.** Ejemplo de las recomendaciones suministradas por los fabricantes con respecto a la lubricación.

MAXIMO INTERVALO DE LUBRICACION PARA MOTORES MONTADOS EN LA HORIZONTAL													
RODAMIENTO FIJOS DE BOLAS													
Rodamiento	Polos	Intervalo de lubricación (horas)		Cantidad de grasa (gramos)	Límite de velocidad de los rodamientos (rpm)		Rodamiento	Polos	Intervalo de lubricación (Horas)		Cantidad de grasa (gramos)	Límite de Velocidad de los rodamientos (rpm)	
		60 Hz	50 Hz		100%	75%			60 Hz	50 Hz		100%	75%
6204	8 ou +	12000	13200	5	15000	11250	6216	8 ou +	8000	9000	20	4500	3375
	6	10200	11300					6	6800	7500			
6205	8 ou +	11100	12300	5	13000	9750	6316	4	4800	5600	35	3800	2850
	6	9500	10500					2	750	1800			
6206	8 ou +	10500	11800	5	11000	8250	6218	8 ou +	7700	8700	25	4000	3000
	6	9000	9900					6	6300	7200			
6306	4	7100	7800	10	9500	7125	6318	4	4500	5300	45	3600	2700
	2	4500	5100					2	-	650			
6307	4	6800	7500	10	8500	6375	6220	8 ou +	7500	8400	35	3600	2700
	2	4100	4800					6	6000	6900			
6208	8 ou +	9800	10700	10	8500	6375	6222	8 ou +	7200	8300	40	2800	2100
	6	8100	9200					6	5900	6800			
6308	4	6300	7200	10	7500	5625	6224	8 ou +	7100	8000	45	2600	1950
	2	3800	4500					6	5600	6500			
6209	8 ou +	9300	10400	10	7500	5625	6226	8 ou +	6600	7700	50	2400	1800
	6	8000	8900					6	5300	6200			
6309	4	6200	6900	15	6700	5025	6228	8 ou +	6200	7100	55	2200	1650
	2	3500	4200					6	4800	5700			
6210	8 ou +	9000	10100	10	7100	5325	6230	8 ou +	5700	6800	65	2000	1500
	6	7700	8600					6	4400	5300			
6310	4	5900	6600	15	6000	4500	6232	8 ou +	5400	6300	70	1900	1425
	2	2900	3900					6	4100	5000			
6211	8 ou +	8900	9800	15	6300	4725	6234	8 ou +	5100	6000	85	1800	1350
	6	7400	8300					6	3800	3800			
6311	4	5700	6500	20	5600	4200	6236	8 ou +	4500	5300	160	1400	1050
	2	2400	3800					6	2600	3900			
6212	8 ou +	8600	9600	15	5600	4200	6238	8 ou +	4500	5300	160	1400	1050
	6	7200	8100					6	2600	3900			
6312	4	5400	6200	20	5300	3975	6240	8 ou +	3600	4500	205	1200	900
	2	2100	3300					6	1400	2700			
6214	8 ou +	8300	9300	15	5000	3750	6242	8 ou +	3600	4500	130	1300	975
	6	6900	7800					6	1400	2700			
6314	4	5100	5900	30	4500	3375	6244	8 ou +	3600	4500	130	1300	975
	2	1400	2600					6	1400	2700			
6315	2	1050	2100	30	4300	3225	6246	8 ou +	2000	3300	195	1100	825

MAXIMO INTERVALO DE LUBRICACION PARA MOTORES MONTADOS EN LA HORIZONTAL													
RODAMIENTOS DE RODILLOS CILINDRICOS													
Rodamiento	Polos	Intervalo de Lubricación (Horas)		Cantidad de Grasa (gramos)	Límite de Velocidad de los Rodamientos (rpm)		Rodamiento	Polos	Intervalo de Lubricación (horas)		Cantidad de Grasa (gramos)	Límite de Velocidad de los rodamientos (rpm)	
		60 Hz	50 Hz		100%	75%			60 Hz	50 Hz		100%	75%
NU310	4	4700	5300	15	5600	4200	NU224	8 ou +	5600	6500	45	2400	1800
NU212	8 ou +	6900	7700	15	5000	3750		6	4200	5100			
	6	5700	6500				NU324	4	1700	2700	75	1900	1425
NU312	4	4100	5000	20	4000	3000		NU226	8 ou +	5300	6000	50	2200
NU214	8 ou +	6600	7400	15	4500	3375	6		3600	4800			
	6	5400	6200				NU326	4	1400	2300	85	1800	1350
NU314	4	3500	4700	30	3600	2700		NU228	8 ou +	5000	5700	55	2000
NU216	8 ou +	6300	7200	20	4000	3000	6		3000	4400			
	6	5300	6000				NU328	4	1050	1800	95	1800	1350
NU316	4	3000	4200	35	3200	2400		NU230	8 ou +	4500	5400	65	1900
NU218	8 ou +	6200	6900	25	3600	2700	NU330	6	2600	3800	105	1700	1275
	6	5000	5700				NU232	8 ou +	3900	5000	70	1800	1325
NU318	4	2700	3800	45	2800	2100		NU332	6	2300	3300	120	1500
NU220	8 ou +	6000	6800	35	3200	2400	NU234	8 ou +	3500	4800	85	1800	1325
	6	4800	5600					6	1800	2900		130	1600
NU320	4	2400	3300	50	2400	1800							
NU222	8 ou +	5700	6600	40	2800	2100							
	6	4500	5400										
NU322	4	2000	3000	60	2000	1500							

Fuente: Ver referencia [42]

**Tabla 13.** Ejemplo de las recomendaciones de un fabricante con respecto a las grasas que se deben usar en sus motores eléctricos.

ALGUNAS GRASAS TÍPICAS PARA DETERMINADAS APLICACIONES			
FABRICANTE	APLICACION	GRASA	TEMPERATURA DE TRABAJO CONSTANTE (°C)
ESSO	NORMAL	POLYREX EM (BASADA EN POLYUREA)	(-30 a +170)
		UNIREX N2 (BASADA EN LITIO)	(-30 a +165)
SHELL		(*)ALVANIA R3 (BASADA EN LITIO)	(-35 a +130)
KLÜBER	BAJAS TEMPERATURAS	ISOFLEX NBU15 (COMPLEJO DE BARIO)	(-60 a +130)

Fuente: Ver referencia [42]

## ANEXO D

### TABLAS DE SOLUCION DE PROBLEMAS PARA MOTORES ELÉCTRICOS ASÍNCRONOS (EJEMPLO)

A continuación se muestra a manera de ejemplo una tabla, acerca de algunas fallas que se pueden presentar en los motores eléctricos y sus posibles causas y soluciones. Esta información generalmente es suministrada por los fabricantes.

**Tabla 14.** Relación básica de problemas con motores.

ANORMALIDAD	POSIBLES CAUSAS	CORRECCIÓN
El motor no arranca ni acoplado ni desacoplado	▪ Como mínimo dos cables de alimentación están interrumpidos, sin tensión.	▪ Verificar el panel de comando, los cables de alimentación, los terminales.
	▪ El rotor está bloqueado.	▪ Destruir el rotor
	▪ Cojinete dañado.	▪ Reemplazar el cojinete.
El motor arranca vacío, pero falla cuando se aplica carga. Arranca muy lentamente y no logra rotación nominal.	▪ Par de carga muy grande durante el arranque.	▪ No aplicar carga en la máquina accionada durante el arranque.
	▪ Tensión de alimentación muy baja.	▪ Medir la tensión de alimentación; ajustar el valor correcto.
	▪ Caída de tensión muy alta en los cables de alimentación.	▪ Verificar dimensionamiento de la instalación (transformador, sección de los cables, verificar relés, disyuntores, etc.).
	▪ Rotor con barras falladas o interrumpidas.	▪ Verificar y reparar la bobina del rotor.
	▪ Un cable de alimentación se interrumpió después del arranque.	▪ Verificar los cables de alimentación.
La corriente del estator oscila en carga con el doble de frecuencia de deslizamiento. El motor presenta un zumbido en el arranque.	▪ La bobina del rotor está interrumpida.	▪ Verificar y reparar la bobina del rotor.
Corriente a vacío muy alta.	▪ Tensión de alimentación muy alta.	▪ Medir la tensión de alimentación y ajustarla al valor correcto.
Calentamientos localizados en la bobina del estator.	▪ Cortocircuito entre espiras.	▪ Rebobinar.
	▪ Interrupción de hilos paralelos o fases de la bobina del estator.	
	Conexión deficiente.	▪ Rehacer la conexión.
Calentamientos localizados en el rotor.	▪ Interrupciones en la bobina del rotor.	▪ Reparar la bobina del rotor o reemplazarla.
Ruido anormal durante operación con carga.	▪ Causas mecánicas.	▪ El ruido normalmente disminuye con la caída de rotación; ver también: "operación ruidosa cuando está desacoplado".
	▪ Causas eléctricas.	▪ El ruido desaparece cuando se desconecta el motor. Consultar a WEG.
Cuando está acoplado aparece un ruido, desacoplado el ruido desaparece.	▪ Defecto en los componentes de transmisión o en la máquina accionada.	▪ Verificar la transmisión de fuerza o acoplamiento y el alineado.
	▪ Defecto en la transmisión por engranaje.	▪ Alinear el accionamiento.
	▪ Base desalineada/desnivelada.	▪ Realinear/nivelar el motor y la máquina accionada.
	▪ Balanceado deficiente de los componentes o de la máquina accionada.	▪ Hacer nuevo balanceado.
	▪ Acoplamiento defectuoso;	▪ Reparar o reemplazar el acoplamiento.
	▪ Sentido de rotación del motor erróneo.	▪ Invertir la conexión de 2 fases entre sí.

Fuente: Ver referencia [43]

## ANEXO E

### HERRAMIENTAS ADICIONALES DE LA CONFIABILIDAD OPERACIONAL

**1. “Análisis de Criticidad (CA).** Aunque NO será foco de este trabajo, vale la pena mencionar que el análisis de criticidad es una metodología que permite jerarquizar instalaciones y equipos, en función de su impacto o importancia en el proceso, con el fin de facilitar la toma de decisiones.

La información recolectada en este estudio podrá ser utilizada para:

- Priorizar órdenes de trabajo de operaciones y mantenimiento.
- Priorizar proyectos de inversión.
- Diseñar políticas de mantenimiento.
- Seleccionar una política de manejo de repuestos y materiales.
- Dirigir las políticas de mantenimiento a las áreas o sistemas más críticos.

Los criterios a tomar en cuenta para la elaboración de este análisis son los siguientes: seguridad, ambiente, producción, costos (Operaciones y Mantenimiento), frecuencia de fallas y tiempo promedio para reparar.

A través de los aspectos mencionados, se observa claramente la gran utilidad del Análisis de Criticidad, de allí su importancia. Este análisis permite obtener una jerarquización validada de todos los procesos / sistemas lo cual permite:

- Utilización óptima de los recursos humanos y económicos dirigidos hacia sistemas claves de alto impacto.
- Potencializar adiestramiento y desarrollo de habilidades en el personal, basado en la criticidad de sus procesos y sistemas.
- Priorizar la ejecución / detección de oportunidades perdidas y aplicación de otras herramientas de Confiabilidad Operacional.

**2. Análisis Causa Raíz (RCA).** Dentro del marco de confiabilidad es la herramienta principal para determinar las causas fundamentales que generan una

repetición de falla o en su defecto dentro de un conjunto de fallas, la anomalía de mayor peso en cuanto al impacto operacional, económico, de seguridad y de ambiente. Es una herramienta sistemática que se aplica con el objetivo de determinar las causas que originan las fallas, sus impactos y frecuencias de aparición, para luego mitigarlas o suprimirlas totalmente. Se aplica generalmente en problemas puntuales para equipos críticos de un proceso o cuando existe la presencia de fallas repetitivas.

**3. Inspección Basada en Riesgos (RBI).** Es una metodología que permite determinar la probabilidad de falla de un equipo que transporte y/o almacene fluidos y las consecuencias que estas pudieran generar sobre la gente, el ambiente y los procesos.

**4. Análisis de Árbol de Falla (FTA).** La técnica del diagrama del árbol de falla es un método que nos permite identificar todas las posibles causas de un modo de falla en un sistema en particular. Además nos proporciona una base para calcular la probabilidad de ocurrencia por cada modo de falla del sistema. Mediante un FTA se observa en forma gráfica la relación lógica entre un modo de falla de un sistema en particular y la causa básica de la falla.

**5. Optimización costo riesgo.** La optimización costo riesgo es una metodología que permite determinar los costos asociados a la realización de actividades de mantenimiento preventivo y los beneficios esperados por sus ejecuciones, sin dejar de considerar los riesgos involucrados, para identificar la frecuencia óptima de las acciones de mantenimiento con base en el costo total mínimo que se genera. El objetivo de una Optimización Costo Riesgo es determinar la frecuencia óptima de las acciones de mantenimiento preventivo por medio de la realización de un balance de costos/riesgos asociados a estas actividades y los beneficios que generan". [19]